



**TUGAS AKHIR – TL141584**

**ANALISA KEGAGALAN PADA  
KOPLING FLUIDA 18M3114 DI  
PABRIK NPK-3 PT. PETROKIMIA -  
GRESIK**

**GENKI RAMADYAN PRIAMBADHA**  
NRP 2711 100 114

Dosen Pembimbing :  
Ir. Rochman Rochiem, M. Sc.  
Wikan Jatimurti ST., M.Sc.

**JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI**  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2015

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



**FINAL PROJECT – TL141584**

**FAILURE ANALYSIS FLUID  
COUPLING 18M3114 AT  
PT. PETROKIMIA – GRESIK NPK-3**

**GENKI RAMADYAN PRIAMBADHA**  
NRP 2711 100 114

Advisor Lecturer :

Ir. Rochman Rochiem, M. Sc.

Wikan Jatimurti ST., M.Sc.

**MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING  
DEPARTEMENT**

Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya  
2015

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

**ANALISA KEGAGALAN PADA KOPLING FLUIDA  
18M3114 DI PABRIK NPK-3 PT. PETROKIMIA –  
GRESIK**

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada**

**Bidang Studi Korosi dan Analisa Kegagalan  
Program Study S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Oleh :

**GENKI RAMADYAN PRIAMBADHA**  
NRP. 2711 100 114

Disetujui Oleh Dosen Pembimbing dan Asisten Dosen  
Pembimbing Tugas Akhir :

1. Ir. Rochman Rochiem, M.Sc ..... (Pembimbing I)  
2. Wikan Jatimurti ST., M.Sc. .... (Pembimbing II)



*(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)*

## **Analisa Kegagalan Kopling Fluida 18M3114 di Pabrik NPK-3 PT. Petrokimia Gresik**

**Nama** : Genki Ramadyan Priambadha  
**NRP** : 2711 100 114  
**Jurusan** : Teknik Material dan Metalurgi FTI  
ITS  
**Dosen Pembimbing** : Ir. Rochman Rochiem, M. Sc  
Wikan Jatimurti ST., M.Sc.

### **ABSTRAK**

Kopling fluida merupakan komponen penting pada penggerak mesin pengering pupuk yang berfungsi sebagai transmisor kecepatan. Pada tanggal 01 Oktober 2014, kegagalan dialami oleh kopling fluida 18M3114 di Pabrik NPK-3 yang pecah menjadi tiga bagian. Dari hasil pengujian Optical Emission Spectrometry (OES) diketahui bahwa material komponen ini memenuhi standar **Al EN AB – AlSi11Cu2(Fe)**. Uji kekerasan dengan metode vickers dilakukan untuk membandingkan distribusi kekerasan material dengan standar. Nilai kekerasan spesimen sebesar 79.48 HVN sedangkan standar material adalah 90 HVN. Hal ini menunjukkan bahwa material tersebut tidak memenuhi standar operasional. Nilai tegangan dari hasil analisa perhitungan dengan metode Tresca sebesar 196,88 MPa dimana tegangan ini melebihi batas maksimal tegangan yang diperbolehkan yaitu sebesar 140 Mpa. Pola patahan ditunjukkan dengan hasil analisa SEM dan foto makro yang memperlihatkan adanya initial dan final crack sebagai akibat dari beban berlebih yang diberikan secara terus menerus dan material yang tidak memenuhi standar.

**Kata kunci** : **Kopling fluida, Al EN AB – AlSi11Cu2(Fe),  
Fracture, Overload**

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## **Failure Analysis on Fluid Coupling 18M3114 of NPK-3 Plant at PT. Petrokimia Gresik**

**Name** : Genki Ramadyan Priambadha  
**NRP** : 2711 100 114  
**Department** : Materials and Metallurgical  
Engineering, FTI-ITS  
**Advisor** : Ir. Rochman Rochiem, M. Sc  
Wikan Jatimurti ST., M.Sc.

### **ABSTRACT**

Fluid coupling is an important component in the fertilizer drying machine driver which functioned as speed transmitter. On October 1<sup>st</sup> 2014, fluid coupling 18M3114 suffered failure in NPK-3 plant which broke into three pieces. From Optical Emission Spectrometry (OES) analysis, it was identified that the material used for the component is in accordance with **Al EN AB – AlSi11Cu2(Fe)** standard. Hardness test using Vickers method was conducted to compare the hardness number distribution in the material to the distribution in the standard. Hardness value measured for the specimen is 79.48 VHN while the standard material is 90 VHN. This indicated that the material didn't met the operational standard. Stress value calculated using Tresca method was 196,88 MPa which is exceeded the allowed maximum stress, 140 Mpa. Fracture pattern shown by SEM analysis and macro-visual analysis showed the initial and final crack as a result of constant over-loading and an inappropriate material in accordance to the operational standard.

**Keywords:** Fluid coupling, Al EN AB – AlSi11Cu2(Fe), Fracture, Overload

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **KATA PENGANTAR**

Terima kasih atas rahmat yang diberikan oleh Allah SWT sehingga penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan judul :

### **“Analisa Kegagalan Pada Kopling Fluida 18M3114 Di Pabrik NPK-3 PT. Petrokimia - Gresik”**

Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri (FTI) Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Penulisan Tugas Akhir ini dapat terlaksana dengan baik atas bantuan, bimbingan, dan saran dari semua pihak. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada :

1. Allah SWT
2. Bapak Dr. Sungging Pintowantoro, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS
3. Bapak Ir. Rochman Rochiem, M.Sc selaku dosen pembimbing dan Bapak Wikan Jatimurti ST., M.Sc. selaku asisten pembimbing yang telah membimbing dan memotivasi penulis
4. Bapak Dr. Agung Purniawan, S.T. M.Eng, selaku dosen yang telah berbaik hati untuk selalu menfollow up progress tugas akhir penulis
5. Bapak Rezki Anjung, S.T., yang telah banyak membantu penulis dalam pengambilan data dan melakukan penelitian di PT. Petrokimia Gresik
6. Bapak Dr. Eng. Hosta Ardhyananta, S.T., M.Sc, dan Bapak Sutarsis, ST., M.Sc, selaku dosen penguji sidang akhir yang telah memberikan saran demi perbaikan ke depan

7. Bapak Sanny Romadhona, Alm. yang telah berkorban dan berusaha untuk membiayai penulis dalam menempuh perkuliahan dan Ibu Dian Istiana, terima kasih atas pengertian dan kasih sayang, motivasi serta doa yang tidak pernah putus
8. Bapak dan Ibu dosen, serta karyawan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS

Penulis menyadari bahwa penyusunan Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan, maka dari itu kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan. Semoga tulisan ini dapat memberi manfaat.

Surabaya, Juli 2015  
PENULIS

## DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR JUDUL.....	i
TITLE .....	iii
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
ABSTRAK .....	vii
ABSTRACT .....	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI .....	xiii
DAFTAR GAMBAR .....	xv
DAFTAR TABEL .....	xix
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	2
1.5 Manfaat Penelitian.....	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Pengertian Kopling Fluida .....	3
2.1.1 Parameter Unjuk Kerja .....	4
2.1.2 Tegangan (stress) .....	6
2.1.3 Kriteria Luluh .....	7
2.2 Aluminium.....	7
2.2.1 Paduan Alumunium-Silikon-Tembaga .....	8
2.2.2 Efek Penambahan Manganese (Mn) .....	9
2.2.3 Efek Penambahan Nickel (Ni) .....	9
2.2.4 Efek Penambahan Tin (Sn) .....	10
2.3 Analisa Kegagalan.....	10
2.4 Prosedur dalam Analisa Kegagalan.....	12
2.5 Patah Getas dan Patah Ulet.....	13
2.5.1 Patah Ulet .....	14
2.5.2 Patahan Getas .....	17
2.6 Mekanisme Pembentukan Patah Lelah.....	19

2.7.1 Tahap Retak Awal ( <i>Crack Initiation</i> ).....	20
2.7.2 Tahap Perambatan Retak ( <i>Crack Propagation</i> ).....	21
2.7 Karakteristik Patahan .....	22
2.8 Pengujian Kekerasan .....	24
2.8.1 Uji Kekerasan Vickers.....	25
2.9 <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM) .....	25
2.10 Pengukuran Getaran.....	26
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b>	
3.1 Diagram Alir Penelitian .....	29
3.2 Metode Penelitian.....	30
3.3 Material yang digunakan.....	30
3.4 Peralatan .....	31
3.5 Tahapan Penelitian .....	32
3.5.1 Review Dokumen Perusahaan .....	32
3.5.2 Preparasi spesimen.....	33
3.5.3 Uji Komposisi .....	33
3.5.4 Pengamatan Makroskopik.....	33
3.5.5 Pengamatan mikroskopik.....	34
3.5.6 Uji Kekerasan .....	35
3.6 Rancangan Penelitian .....	36
<b>BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN</b>	
4.1 ANALISA DATA.....	37
4.1.1 Record Kopling Fluida.....	37
4.1.2 Hasil OES (Uji Komposisi) .....	38
4.1.3 Hasil Perhitungan Analisa Tegangan.....	39
4.1.4 Hasil Fraktrografi.....	40
4.1.5 Hasil Pengujian kekerasan <i>Vickers</i> .....	47
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b>	
5.1 Kesimpulan .....	52
5.2 Saran.....	52
DAFTAR PUSTAKA.....	xxi
LAMPIRAN .....	xxv

## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Daftar pemberian nilai C untuk unit-unit yang digunakan (Mott, 2009) .....	6
Tabel 2.2 Sifat mekanik dan fisik paduan aluminium-silikon-tembaga (Stena Manual Book, 2010) .....	9
Tabel 2.3 Permasalahan dalam kegagalan komponen mesin .....	11
Tabel 2.4 Penyebab kegagalan dalam Komponen mesin .....	12
Tabel 2.5 Kasus kegagalan material akibat perawatan Komponen mesin.....	11
Tabel 3.1 Rancangan Penelitian Pada Spesimen .....	38
Tabel 4.1 Dimensi kopling fluida 18M3114 PT. Petrokimia Gresik .....	36
Tabel 4.2 Data Operasi kopling fluida 18M3114 PT. Petrokimia Gresik .....	38
Tabel 4.3 Hasil pengujian <i>Optical Emmision Spectroscopy</i> ...	38
Tabel 4.4 Nilai kekerasan vickers komponen kopling fluida.	48

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Komponen utama kopling fluida (Junior, 2013) .....	3
Gambar 2.2 Skematik ciri patah getas dan patah ulet dari diagram tegangan-regangan (Callister,2007).....	6
Gambar 2.3 (a) bentuk patahan ulet, (b) bentuk patahan ulet setelah terjadi <i>necking</i> , (c) bentuk patahan getas tanpa terjadi deformasi plastis (Callister,2007).....	15
Gambar 2.4 Tahap patahan cup dan cone (a) awal <i>necking</i> , (b) terbentuknya cavity kecil, (c) pengumpulan <i>cavity</i> hingga menjadi retakan, (d) perambatan retak, (e) patahan geser dengan sudut 45° terhadap arah tegangan (Callister,2007).....	15
Gambar 2.5 (a) patah ulet ( <i>cup and cone</i> ) pada aluminium (b) patah getas pada <i>mild steel</i> (Callister,2007).....	16
Gambar 2.6 (a) SEM yang menunjukkan <i>spherical dimple</i> karakteristik, patahan hasil beban tarik <i>unixial</i> , 3300x.(b) SEM yang menunjukkan <i>spherical dimple</i> karakteristik hasil beban geser, 5000x (Callister,2007) .....	17
Gambar 2.7 (a) Foto yang menunjukkan bentuk V “chevron” sebagai karateristik patah getas. (b) Foto yang menunjukkan permukaan patah getas daerah asal retakan. (Callister,2007) .....	18
Gambar 2.8 (a) <i>skema perambatan retak yang melewati butir (transgranular)</i> (b) <i>hasil SEM dari patah secara transgranular</i> (Callister,2007) .....	18

Gambar 2.9	(a) skema perambatan retak yang terjadi sepanjang batas butir ( intergranular) (b) hasil SEM dari patah secara intergranular (Callister,2007).....	19
Gambar 2.10	Mekanisme patah lelah dan faktornya (ASM Handbook Vol.19 <i>Fatigue and Fracture</i> ,2002)19	
Gambar 2.11	Model Wood untuk pengintian retak (Nishida, Shin-ichi,1992).....	20
Gambar 2.12	Mekanisme penumpulan ujung retakan secara plastis (a) beban nol (b) beban tarik kecil (c) beban tarik maksimum (d) beban-tekan kecil (e) beban tekan maksimum (f) beban tarik kecil (Callister,2007).....	22
Gambar 2.13	Foto SEM yang menunjukkan <i>Beachmarks</i> dan striasi secara mikro (Poursaedi, 2005) .....	23
Gambar2.14	Retakan dengan pola rambatan (a) Transgranular (b) Intergranular (Colangelo, 1989) .....	24
Gambar 2.15	Parameter kondisi getaran berdasarkan ISO 2372 (International Standart ISO 2372, 1974). 27	
Gambar 2.16	Range parameter getaran berdasarkan ISO 2372 (International Standart ISO 2372, 1974). 28	
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian.....	31
Gambar 3.2	Komponen kopling fluida yang terpecah menjadi tiga bagian .....	31
Gambar 3.3	Permukaan pecahan yang di indikasi ada <i>initial crack</i> . .....	34
Gambar3.4	(a) Kamera merk Canon tipe SLR. (b)Stereomicroscope .....	35
Gambar 4.1	Desain kopling fluida 18M114 PT. Petrokimia Gresik.....	37
Gambar 4.2	Pembagian daerah retak awal (a), penjaralan retak (b), dan daerah patah akhir (c) pada material yang mengalami kegagalan .....	40

Gambar 4.3	Perbesaran pada daerah <i>initial crack</i> (a) diambil dengan <i>stereomicroscope</i> perbesaran 20x....	42
Gambar 4.4.	Hasil SEM pada material kopling fluida dalam berbagai macam perbesaran (a) Perbesaran 50x pada sampel yang mengalami kegagalan (b) Perbesaran 500x pada daerah awal <i>initial crack</i> (c) Perbesaran 1000x pada daerah awal <i>initial crack</i> .....	42
Gambar 4.5	Perbesaran pada daerah <i>crack propagation</i> diambil dengan <i>stereomicroscope</i> perbesaran 20x .....	43
Gambar 4.6	Daerah letak <i>crack propagation</i> (a) Hasil SEM pada material kopling fluida dalam berbagai macam perbesaran (b) Perbesaran 50x pada sampel yang mengalami kegagalan, (c) perbesaran 1000x pada daerah patah getas .....	44
Gambar 4.7	Perbesaran pada daerah patah akhir dengan <i>stereomicroscope</i> dengan perbesaran 20x .....	45
Gambar 4.8	Daerah letak final crack (a). Hasil SEM pada material kopling fluida dalam berbagai macam perbesaran (b) perbesaran 50x pada rambatan patah akhir, (c) Perbesaran 500x pada daerah patah akhir .....	46
Gambar 4.9	(a) Posisi indentasi pada material daerah patahan (b) Posisi indentasi pada material daerah jauh dari patahan.....	47
Gambar 4.10	Grafik distribusi kekerasan pada daerah kopling fluida yang mengalami patahan dan yang berada jauh dari patahan .....	49

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **BAB 1**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1 Latar Belakang**

PT. Petrokimia Gresik merupakan salah satu produsen pupuk yang berperan penting dalam pendistribusian pupuk di Indonesia. Pada tahun 2012, dipercayai pemerintah untuk meningkatkan kapasitas produksi menjadi 5,4 juta ton, atau meningkat 1,6 juta ton dibandingkan tahun 2011. Hal ini menjadikan PT Petrokimia Gresik sebagai produsen pupuk yang memasok 50% kebutuhan pupuk subsidi nasional. ([koran.republika.co.id](http://koran.republika.co.id)).

Untuk menunjang penyediaan pupuk, PT Petrokimia Gresik membagi pabrik menjadi tiga pabrik utama, yaitu : Pabrik 1 (pabrik pupuk nitrogen), Pabrik 2 (pabrik pupuk Phospat) dan pabrik 3 (pabrik penunjang).

Salah satu mesin penunjang kinerja pabrik tersebut adalah mesin pengering pupuk (*dryer*), dimana mesin ini merupakan salah satu komponen yang sangat penting. Penggerak mesin ini adalah sebuah generator yang ditransmisikan oleh sebuah kopling fluida (*fluid coupling*). Pada tanggal 01 Oktober 2014 kopling fluida pada mesin pengering pupuk NPK 3 pada PT. Petrokimia Gresik dengan part number 18M3114 pecah menjadi tiga bagian. Permasalahan yang sering terjadi pada kopling fluida diakibatkan karena kegagalan yang sudah melebihi batas yang diharuskan, crack, wear resistance, internal stress dll. (Rathi Transpower Private Limited, 2012). Kerusakan ini mengakibatkan mesin pengering pupuk harus dimatikan dan proses produksi akan terhenti sementara hingga kopling fluida tersebut diganti dengan *part* yang baru. Disamping itu, pembelian *part* baru kopling fluida harus melalui proses pemesanan terlebih dahulu. sehingga sangat menghambat proses produksi PT Petrokimia Gresik. Untuk menanggulangi hal yang sama, analisa kegagalan pada kopling fluida ini perlu dilakukan.



## **1.2 Rumusan Masalah**

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Faktor apa yang menyebabkan kegagalan kopling fluida pada mesin pengering pupuk?
2. Bagaimana mekanisme kegagalan pada kopling fluida pada mesin pengering pupuk?

## **1.3 Batasan Masalah**

Agar penelitian ini menjadi terarah dan memberikan kejelasan analisis permasalahan, maka dilakukan pembatasan permasalahan sebagai berikut :

1. Desain kopling fluida memenuhi standart operasional.
2. Pengaruh lingkungan diabaikan.

## **1.4 Tujuan Penelitian**

Tujuan penelitian ini adalah :

1. Menganalisa faktor penyebab terjadinya kegagalan pada komponen kopling fluida pada mesin pengering pupuk.
2. Menganalisa mekanisme komponen kopling fluida pada mesin pengering pupuk.

## **1.5 Manfaat Penelitian**

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan penanganan bila terjadi kegagalan dikemudian hari dan dasar pengembangan pada ilmu berikutnya.

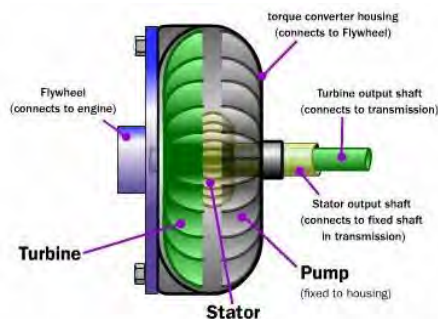
## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Pengertian Kopling Fluida**

Pada tahun 1905 oleh Fettinger di Jerman dibuat untuk pertama kali suatu kopling yang meneruskan daya melalui fluida sebagai zat perantara. Kopling ini disebut kopling fluida, dimana antara kedua poros tersebut tidak ada hubungan mekanis sehingga, untuk melakukan pemindahan daya adalah dengan memanfaatkan tenaga hidrolis. Tenaga hidrolis didapat dengan menempatkan cairan/ minyak pada suatu wadah/ mekanisme yang diputar, sehingga cairan akan terlempar/ bersirkulasi oleh adanya gaya sentrifugal akibat putaran sehingga fluida mempunyai tenaga hidrolis. Fluida yang bertenaga inilah yang digunakan sebagai penerus/ pemindah tenaga.

Komponen utama pada unit kopling fluida adalah : pump impeller, turbin runner dan stator. Pump impeller merupakan mekanisme pompa yang membangkitkan tenaga hidrolis pada fluida. Turbin runner adalah mekanisme penangkap tenaga hidrolis fluida yang dibangkitkan pump impeller. Stator adalah mekanisme pengatur arah aliran fluida agar tidak terjadi aliran yang merugikan tetapi justru aliran yang menguntungkan sehingga didapatkan peningkatan momen/torsi.



**Gambar 2.1** Komponen utama kopling fluida (Junior, 2013)



Bila suatu impeller pompa dan suatu raner turbin dipasang saling berhadapan, dimana keduanya berada didalam ruangan yang berisi minyak, maka jika poros input yang dihubungkan dengan impeller pompa diputar, minyak yang mengalir dari impeller akan menggerakkan raner turbin yang dihubungkan dengan poros output. Momen puntir yang diteruskan adalah berbanding lurus dengan pangkat lima dari diameter-diameter luar kopling dan kuadrat dari putaran. Dalam keadaan bekerja normal, putaran poros output adalah lebih rendah daripada putaran poros input. Perbedaan putaran ini disebut slip, yang besarnya antara 2 sampai 5% dari putaran poros input. Dalam keadaan slip sebesar ini efisiensi kopling mencapai harga maksimumnya (Suga, 1997).

Keuntungan kopling ini adalah membuat gerakan awal menjadi lebih lembut dan elastis, sebab momen tidak dipindahkan oleh gesekan yang dapat meredam getaran dan tumbukan (Stolk, 1981).

### **2.1.1 Parameter Unjuk Kerja**

Parameter dalam pengaturan kopling dan rem ditunjukkan pada data berikut (Mott, 2009) :

1. Torsi yang dibutuhkan untuk mempercepat dan memperlambat sistem
2. Waktu yang dibutuhkan untuk melakukan perubahan kecepatan
3. Tingkat siklus : jumlah siklus *on/off* per satuan waktu
4. Kelembaman bagian yang berputar atau bergerak lurus
5. Lingkungan sistem : temperatur, efek pendinginan, dan sebagainya
6. Kemampuan disipasi energy kopling atau rem
7. Ukuran fisik dan konfigurasi
8. Cara cara mengaktifkan
9. Umur dan kendala sistem
10. Biaya dan ketersediaan





Ada dua metode yang digunakan untuk menentukan kapasitas torsi yang dibutuhkan kopling tidak tetap atau rem. Metode pertama berhubungan dengan kapasitas daya motor penggerak sistem. Ingat bahwa umumnya daya = torsi  $\times$  kecepatan putar ( $P = Tn$ ). Kapasitas torsi yang dibutuhkan kemudian biasanya dinyatakan dalam bentuk,

$$T = \frac{CPK}{n} \quad (2.1)$$

dimana, C = Faktor Konvensi satuan

K = Faktor Layanan Berdasarkan Aplikasi

Nilai faktor K pada persamaan torsi merupakan keputusan rancangan. Berikut beberapa pedoman secara umum,

1. Untuk rem pada kondisi rata – rata, gunakan  $K = 1,0$ .
2. Untuk Kopling dengan beban ringan dimana poros output diasumsikan tidak menerima beban normal sampai mencapai kecepatan tertentu, gunakan  $K = 1,5$ .
3. Untuk kopling kerja berat yang harus menggerakkan beban yang besar dengan percepatan, gunakan  $K=3,0$ .
4. Untuk kopling pada sistem yang mempunyai beban variasi, gunakan faktor K sekurang-kurangnya sama dengan faktor dimana torsi puncak motor melampaui torsi beban penuh. Tetapi, untuk motor industri biasa gunakan  $K = 2,75$ . Untuk motor dengan torsi pengawalan yang tinggi (rancangan C atau motor dengan kapasitor-pengawalan), diperlukan  $K = 4,0$ . Dengan ini, kopling akan mampu memindahkan sekurang-kurangnya torsi sebesar motornya dan tidak akan slip setelah mencapainya.
5. Untuk kopling pada sistem yang digerakkan oleh motor bakar, mesin diesel, atau penggerak mula yang lain,



dengan mempertimbangkan kemampuan torsi puncak penggerak, diperlukan  $K = 5,0$ .

Tabel 2.1 memberikan nilai  $C$  untuk unit – unit yang biasa digunakan untuk torsi, daya, dan kecepatan putar. Sebagai contoh, jika daya dalam hp dan kecepatan dalam rpm, maka torsi diperoleh lb.ft, gunakan  $T = 5252 (P/n)$ .

**Tabel 2.1** Daftar pemberian nilai  $C$  untuk unit-unit yang digunakan (Mott, 2009)

<b>Torsi</b>	<b>Daya</b>	<b>Kecepatan</b>	<b>C</b>
lb.ft	Hp	Rpm	5252
Lb.in	Hp	Rpm	63025
N.m	W	Rad/detik	1
N.m	W	Rpm	9,549
N.m	kW	Rpm	9549

### 2.1.2 Tegangan (Stress)

Tegangan adalah besaran pengukuran intensitas gaya yang timbul persatuan luas. Pada umumnya diberikan dalam *pound* atau *newton*, dan luas menahan dalam  $\text{inch}^2$  atau  $\text{mm}^2$ . Akibatnya tegangan biasanya dinyatakan dalam  $\text{pound/inch}^2$  yang sering disingkat *psi* atau  $\text{Newton/mm}^2$  (MPa).

Pada saat benda menerima beban sebesar  $P$  kg, maka benda bertambah panjang sebesar  $\Delta L$  mm. Saat material bekerja tegangan dapat dihitung dengan rumus : (Singer, 1995).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.2)$$

dimana,  $\sigma$  = Tegangan (pascal,  $\text{N/m}^2$ )

$F$  = Beban yang diberikan (newton, dyne)

$A$  = Luas penampang ( $\text{mm}^2$ )



### 2.1.2 Kriteria Luluh

Kriteria Luluh Tegangan Normal Maksimum dari lingkaran Mohr, tegangan normal maksimum  $\sigma_{mak} = \sigma_1 - \sigma_3$ , bila terjadi luluh maka :

$$Y = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (2.3)$$

Kriteria Luluh Tegangan Geser Maksimum ( Tresca) dari lingkaran Mohr tegangan geser maka :

$$\tau_{mak} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (2.4)$$

Terjadi luluh bila

$$\frac{Y}{2} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (2.5)$$

Disini tegangan yang dipertimbangkan hanya yang terkecil dan terbesar. (singer,1995)

## 2.2 Aluminium

Karakteristik dari aluminium yang paling terkenal adalah ringan, berat jenisnya sekitar sepertiga dari baja paduan atau tembaga. Beberapa aluminium memiliki rasio perbandingan dari kekuatan dan berat yang lebih baik dibandingkan dengan baja yang berkekuatan tinggi. Aluminium memiliki *formability*, ketahanan korosi yang tinggi, konduktivitas listrik dan panas yang tinggi. Salah satu karakteristik yang paling penting dari aluminium adalah memiliki *machinability* dan *workability* yang baik.

Penunjukan temper pada aluminium mengikuti asosiasi aluminium dalam sistem penetapan penunjukan temper yang dilakukan sejak tahun 1948 dengan menambahkan tanda hubung. Hal ini digunakan untuk aluminium dan paduan aluminium yang didasarkan pada urutan perlakuan yang digunakan untuk berbagai temper. (Avner, 1974).



Menurut Asosiasi Alumunium, ada 7 penggolongan komposisi coran alumunium paduan, anatra lain : (Kaufman dan Rooy, 2004).

- Alumunium murni 99.00 % atau lebih (1xxx)
- Alumunium-tembaga paduan (2xxx)
- Alumunium-silikon-tembaga dan tau magnesium (3xxx)
- Alumunium-silikon (4xxx)
- Alumunium-magnesium (5xxx)
- Alumunium-zinc-magnesium (7xxx)
- Alumunium-tin (8xxx)

### 2.2.1 Paduan Aluminium-Silikon-Tembaga

Paduan cor aluminium yang paling umum digunakan adalah aluminium yang mengandung silikon (Si) dan tembaga (Cu). Komposisi penambahannya saling berbanding terbalik, beberapa material mengandung tembaga lebih banyak daripada silikon, begitupun sebaliknya. Tembaga memberikan kekuatan dan *machinability* yang baik, sedangkan silikon meningkatkan *castability* dan mengurangi *hot shortness*. Paduan yang mengandung konsentrasi hipoeutektik silikon yang lebih tinggi lebih cocok digunakan untuk pengecoran kompleks dan untuk cetakan permanen dan *die casting*.

Paduan aluminium-silikon-tembaga dengan komposisi tembaga kurang dari 5,6% dapat dikenai perlakuan panas, tetapi yang lebih penting dari paduan ini adalah dengan adanya penambahan magnesium. Hasil perlakuan panas dapat meningkatkan sifat-sifat material termasuk *premium-strength capabilities* (Kaufman dan Rooy, 2004).

Penambahan tembaga digunakan untuk meningkatkan kekuatan dan *fatigue resistance* tanpa menurunkan sifat mampu cor, tetapi akan menurunkan sifat ketahanan korosi. (Mondolfo, 1976).

Kebanyakan paduan silikon hipereutektik (12-30% Si) juga mengandung tembaga. Fasa primer silikon memberi sifat *wear resistance* yang sangat baik dan tembaga menghasilkan



matriks pengerasan dan kekuatan pada saat terjadinya peningkatan temperatur (Kaufman dan Rooy, 2004).

Sifat-sifat mekanik dan fisik secara umum dapat dilihat pada Tabel 2.2

**Tabel 2.2** Sifat mekanik dan fisik paduan aluminium-silikon-tembaga (Stena Manual Book, 2010)

<b>Mechanical and Physical Properties</b>	
Tensile strength, $R_m$ , Mpa, min	240
Proff stress, $R_{p0,2}$ , Mpa, min	140
Elongation $A_{50}$ , %, min	<1
Brinell hardness, HBS, min	80
Density	2,75
Strength	Good
Machinability	Satisfact.
Weldability	Poor
Resistace to corrosion	Poor
Decorative anodizing	Not recom.
Ability to be polished	Satisfact.
Linear thermal expansion, 293-373°K, °K <sup>-1</sup>	20×10-6
Electrical conductivity, MS/m	14 – 18
Thermal conductivity, W/m°K	120 - 130

### **2.2.2 Efek Penambahan Mangan (Mn)**

Mangan pada umumnya dianggap sebagai zat pengotor dalam proses pengecoran, dan dikontrol pada tingkat kadar terendah pada komposisi pengecoran. Mangan merupakan elemen yang sangat penting pada paduan tempa yang dikeraskan, dimana unsur mangan yang sangat tinggi. Pada pengecoran alumunium paduan mangan tidak memberikan manfaat yang signifikan. (Kaufman dan Rooy, 2004).

### **2.2.3. Efek Penambahan Nikel (Ni)**

Pada umumnya Nikel digunakan bersama dengan tembaga untuk meningkatkan ketahanan terhadap temperature



tinggi. Dan juga mengurangi koefisien ekspansi termal. (Kaufman dan Rooy, 2004).

#### **2.2.4 Efek Penambahan Tin (Sn) Paduan Aluminium-Silikon-Tembaga**

Tin sangat efektif dalam meningkatkan sifat ketahanan aus sehingga sangat berguna dalam aplikasi bantalan. Penambahan timah juga dapat meningkatkan *machinability*. (Kaufman dan Rooy, 2004).

Namun Tin dapat menurunkan sifat ketahanan korosi, korosi oleh air mengalir sangat sering bila dibandingkan dengan air yang tidak mengalir. Alumunium-silikon paduan dengan nikel mempunyai sifat tahan air dan uap pada temperature tinggi. (Mondolfo, 1976).

### **2.3 Analisa Kegagalan**

Analisa kegagalan dapat diartikan sebagai pemeriksaan/pengujian terhadap komponen-komponen atau struktur yang mengalami kerusakan beserta kondisi yang menyebabkan kegagalan dengan tujuan untuk mengetahui penyebab dari kegagalan tersebut. Jadi tujuan utama dari analisa kegagalan adalah untuk mengetahui mekanisme terjadinya kegagalan serta memberikan solusi-solusi yang dapat dilaksanakan untuk menanggulangi masalah kegagalan tersebut.

Dengan kata lain, analisa kegagalan berujung pada observasi pada komponen-komponen yang rusak. Pengamatan pola patahan yang rusak adalah kunci bagi seluruh proses analisa kegagalan, oleh sebab itu pengamatan secara makrokopis dan mikrokopis harus dilaksanakan secara bertahap. Selain itu pengujian mekanik juga diperlukan karena secara umum kegagalan disebabkan oleh gaya-gaya yang bekerja dari lingkungan kerja komponen.

Menurut sumber-sumber penelitian yang ada di dunia industri (Brooks,2002). Faktor penyebab kegagalan yang sering terjadi di dunia industri dapat dikarenakan :



### 1. Faktor kesalahan pemilihan material

Hasil penelitian mengenai faktor kegagalan material yang dominan yaitu faktor kesalahan dalam memilih material. Tabel 2.3 dibawah ini menunjukkan statistik tentang permasalahan dalam kasus kegagalan material

**Table 2.3** Permasalahan dalam kegagalan komponen mesin

<b>Permasalahan</b>	<b>%</b>
Kesalahan pemilihan material	38
Cacat produksi	15
Kesalahan perlakuan panas	15
Kesalahan desain mekanik	11
Kondisi operasi yang berlebihan	8
Kondisi lingkungan yang tidak terkontrol	6
Pemeriksaan yang kurang baik	5
Material yang tidak jelas	2

### 2. Perawatan komponen yang kurang baik

Proses perawatan komponen mesin yang kurang baik termasuk salah satu penyebab kegagalan yang paling dominan. Tabel 2.4 menunjukan data mengenai kasus kegagalan material yang terjadi.

**Tabel 2.4** Kasus kegagalan material akibat perawatan komponen mesin

<b>Permasalahan</b>	<b>%</b>
Perawatan yang kurang baik	44
Cacat saat fabrikasi	17
Defisiensi desain	16
Pemakaian yang abnormal	10
Cacat material	7
Penyebab yang tidak jelas	6

### 3. Kesalahan dalam perancangan komponen

Faktor kesalahan dalam proses perancangan komponen mesin adalah sebagai berikut:



1. Kegagalan ulet akibat pembebanan yang melebihi kekuatan material
2. Kegagalan getas akibat beban kejut
3. Kegagalan pada temperature tinggi (pemuluran)
4. *Static delayed fracture*
5. Proses perancangan yang terlalu banyak memicu konsentrasi tegangan seperti takikan
6. Analisa tegangan komponen yang kurang detail yang menyebabkan rawan terjadi kegagalan akibat *overload*
7. Kesalahan dalam menentukan material dari komponen mesin sehingga mempengaruhi hitungan yang dilakukan.

#### 4. Kondisi kerja yang ekstrim

Permasalahan yang spesifik dalam kegagalan komponen mesin akibat kondisi kerja yang ekstrim disajikan dalam Tabel 2.5.

**Tabel 2.5** Penyebab kegagalan dalam komponen mesin

Penyebab Kegagalan	%
Korosi	29
Kelelahan ( <i>fatigue</i> )	25
Kegagalan getas ( <i>brittle fracture</i> )	16
Kelebihan beban	11
Korosi temperature tinggi	7
Korosi retak tegang, korosi lelah, penggetasan hydrogen	6
Pemuluran ( <i>creep</i> )	3
Abrasi, Erosi	3

## 2.4 Prosedur dalam analisa kegagalan

Ketika terjadi sebuah kegagalan atau retak, perlu dilakukan suatu tindakan untuk mencegah terjadinya kegagalan yang sama dengan menginvestigasi dan menganalisa kegagalan komponen yang terjadi. Adapun tindakan yang perlu dilakukan dalam menginvestigasi komponen yaitu (Nishida, 1992):

1. Material yang digunakan





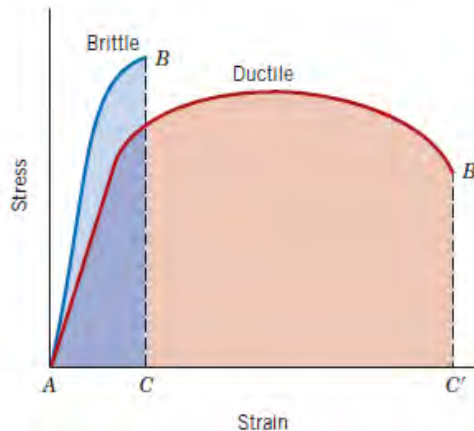
- a. Data produksi : *melting, rolling, forming, casting, heat treatment*, dan proses *machining*
- b. Analisa kimia : pengujian X-Ray, komposisi kimia
- c. Sifat mekanik : *tensile, bending, hardness, impact*, dan *fatigue test*.
- d. Struktur metalurgi : struktur makro dan mikro struktur
- e. Pengerasan permukaan dan tegangan sisa ; *finishing*
- f. Patah permukaan
2. Desain tegangan dan kondisi perawatan
  - a. Kekuatan dari luar : golongan, besar, pengulangan.
  - b. Atmospher : udara, air, air laut, dan sebagainya
  - c. Yang lain : kondisi perbaikan
3. Uji percobaan
  - a. Uji laboratorium : perhitungan tegangan (kekuatan material, *finite element method* (FEM), kekuatan lelah, kekerasan patahan.
  - b. Konfirmasi uji lapangan : ukuran tegangan, uji produksi.
4. Hasil uji seluruhnya.

## 2.5 Patah Getas dan Patah Ulet

Patahan adalah spesimen dari sebuah benda menjadi 2 atau lebih potongan karena terjadinya tegangan statik dan pada temperature yang relatif rendah terhadap titik leleh dari suatu material. Tegangan yang terjadi pada material bisa merupakan tegangan tarik, tegangan kompresi, tegangan geser ataupun torsi. Dalam rekayasa material terdapat dua jenis mode patahan yang mungkin terjadi yaitu patahan ulet dan patah getas. Klasifikasi jenis patahan ini berdasarkan kemampuan sebuah material dalam menerima deformasi plastis yang dapat menyerap energi yang besar sebelum terjadi patahan. Material yang ulet mempunyai deformasi plastis yang tinggi, pembentukan small cavity diujung retak, serta retak memanjang atau menjalar bertahap. Sedangkan pada material yang getas mempunyai deformasi plastis rendah, tegangan lokal meningkat pada ujung retak sehingga retak



menjalar dengan sangat cepat. Pada Gambar 2.2 ditunjukkan diagram tegangan dan regangan dari patahan ulet dan getas.



**Gambar 2.2** Skematik ciri patah getas dan patah ulet dari diagram tegangan-regangan (Callister,2007)

Patahan ulet dan getas pada suatu material tergantung pada kondisi pembebanan. Pada proses terjadinya patahan melibatkan dua tahap yaitu terbentuknya retak dan perambatan sebagai respon dari tegangan yang dialami oleh material. Modus patahan sangat bergantung pada perambatan retak.

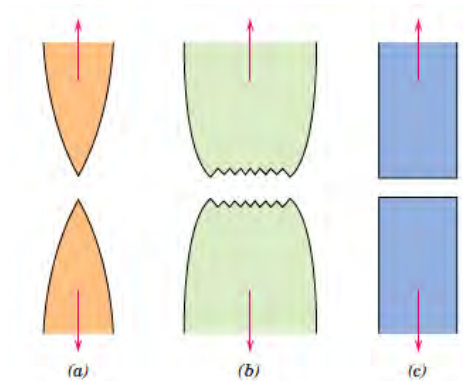
### 2.5.1 Patahan Ulet

Bentuk patahan ulet memiliki karakteristik yang berbeda jika diamati secara makroskopis. Pada Gambar 2.4 ditunjukkan skematik representative dari dua karakteristik profil patahan secara makro. Konfigurasi yang ditunjukkan oleh Gambar 2.4 (a) ditemukan pada material lunak seperti emas pada temperature ruang dan metal, polimer dan inorganik gelas pada temperature yang relatif tinggi.

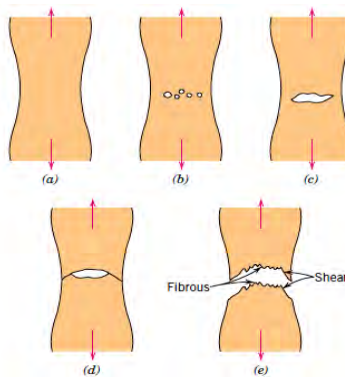
Secara umum profil patahan material ulet akibat tegangan tarik ditunjukkan pada Gambar 2.3(b) dimana patahan didahului oleh adanya necking. Proses patahan ulet dari material terjadi dalam beberapa tahap. Pertama, setelah terjadi pengecilan luasan setempat (*necking*) *cavities* kecil atau *microvoid* terbentuk di



dalam struktur material seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.4.



**Gambar 2.3** (a) bentuk patahan ulet, (b) bentuk patahan ulet setelah terjadi *necking*, (c) bentuk patahan getas tanpa terjadi deformasi plastis ( Callister,2007)



**Gambar 2.4** : Tahap patahan cup dan cone (a) awal *necking*, (b) terbentuknya cavity kecil, (c) pengumpulan *cavity* hingga menjadi retakan, (d) perambatan retak, (e) patahan geser dengan sudut  $45^\circ$  terhadap arah tegangan (Callister,2007)



Kemudian dengan bertambahnya deformasi akibat tegangan maka *microvoid* membesar dan berkumpul menjadi satu yang kemudian *coalesce* membentuk retak secara elips yang memiliki panjang tegak lurus dari arah pembebanan. Retak kemudian tumbuh sejajar dengan arah pembebanan, akhirnya patahan terbentuk oleh perambatan retak yang cepat disekitar area *necking* seperti Gambar 2.5 oleh deformasi geser pada sudut disekitar arah tegangan tarik dimana sudut ini merupakan tegangan geser tertinggi. Terkadang sebuah patahan mempunyai karakteristik kontur seperti *cup* dan *cone* karena salah satu permukaan patahan menyerupai *cone*. Spesimen yang mempunyai bentuk patahan seperti ini berbentuk fibrous yang tidak teratur dimana hal ini menandakan deformasi plastis. Lebih jauh lagi untuk mengetahui informasi mengenai penentuan secara pengujian dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Studi mengenai tipe patahan disebut *fractographic*. *Scanning Electron Microscope* (SEM) lebih banyak digunakan dalam mengamati bentuk crack, patahan karena mempunyai resolusi dan kedalaman observasi yang lebih tinggi dari mikroskopik optik. Gambar 2.5 menunjukkan patah ulet *cup* dan *cone* dan perbedaan patah getas pada *mild steel*.

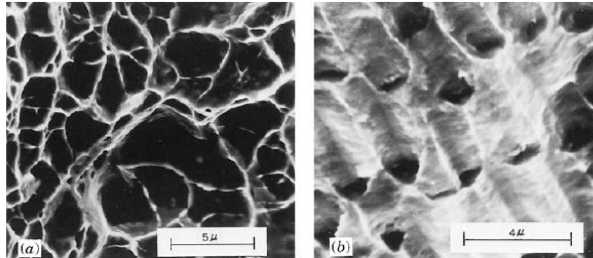


**Gambar 2.5** (a) patah ulet (*cup and cone*) pada aluminium, dan (b) patah getas pada *mild steel* (Callister,2007)

Pada skala makro, patah ulet ditunjukkan dengan adanya perubahan ketinggian yang nyata sepanjang penampang potongan

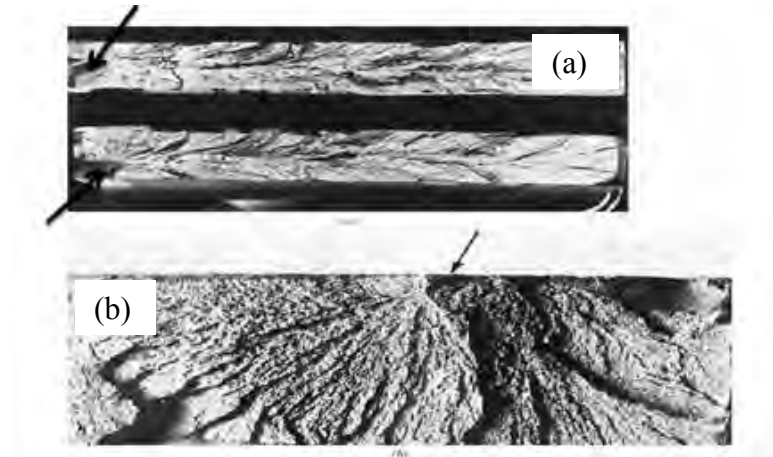


melintang dari benda, biasa dikenal dengan istilah *shear lips*. Kemudian pada skala mikro, patah ulet ditandai dengan adanya profil *dimple* pada permukaan patahnya yang disebabkan oleh penjaralan retakan mikro (*microvoids coalescence*) pada gambar 2.6.



**Gambar 2.6** (a) SEM yang menunjukkan *spherical dimple* karakteristik, patahan hasil beban tarik *uniaxial*, 3300 $\times$ , dan (b) SEM yang menunjukkan *spherical dimple* karakteristik hasil beban geser, 5000 $\times$  (Callister,2007)

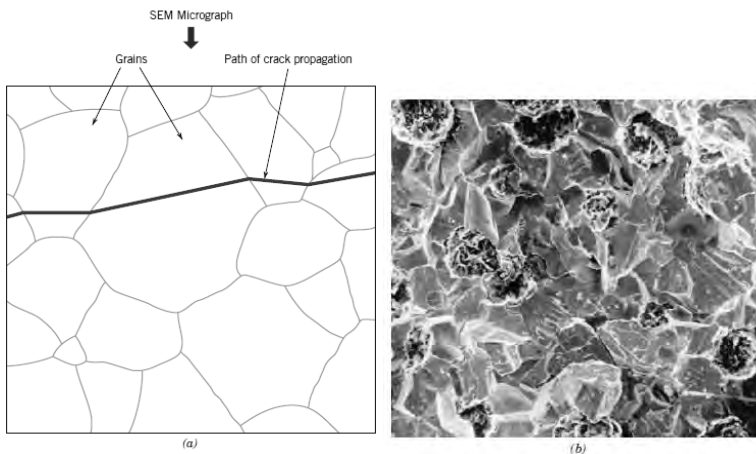
### 2.5.2 Patah Getas



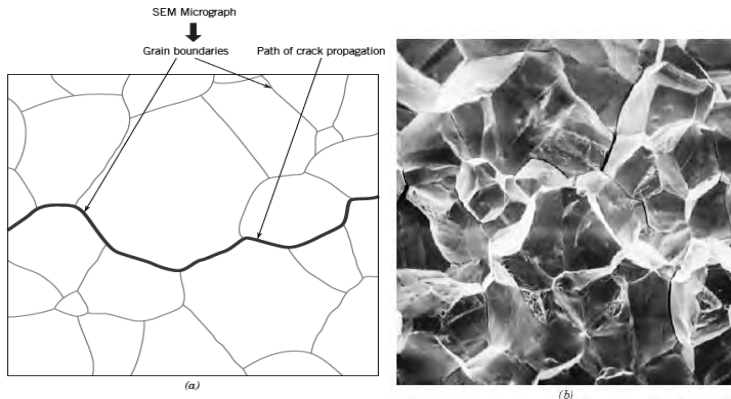


**Gambar 2.7** (a) Foto yang menunjukkan bentuk V “chevron” sebagai karakteristik patah getas dan (b) Foto yang menunjukkan permukaan patah getas daerah asal retakan (Callister,2007)

Patah getas sering terjadi tanpa adanya atau sedikit sekali terjadi deformasi plastis pada material. Retak/ patahan merambat sepanjang bidang-bidang kristalin yang membelah atom-atom material (transgranular). Kemudian pada material lunak dengan butir kasar( *coarse grain*) maka dapat dilihat pola-pola yang dinamakan *chevron* seperti Gambar 2.7(a) atau patah getas permukaan terlihat garis atau daerah asal retakan disebut *fan pattern* seperti pada Gambar 2.7(b). Untuk hasil perambatan dan SEM, dapat terlihat jelas untuk retak yang melewati batas butir (*transgranular*) dan retak yang terjadi sepanjang batas butir (*intergranular*) pada gambar 2.8 dan 2.9.

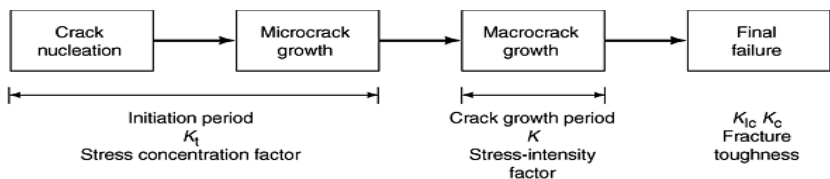


**Gambar 2.8** (a) skema perambatan retak yang melewati butir (*transgranular*) (b) hasil SEM dari patah secara transgranular (Callister,2007)



**Gambar 2.9** (a) skema perambatan retak yang terjadi sepanjang batas butir ( *intergranular*) (b) hasil SEM dari patah secara *intergranular* (Callister,2007)

## 2.6 Mekanisme Pembentukan Patah Lelah



**Gambar 2.10** Mekanisme patah lelah dan faktornya (ASM Handbook Vol.19 *Fatigue and Fracture*,2002)

Kelelahan mengakibatkan terjadinya patah lelah. Patah lelah terjadi melalui tiga tahap yaitu tahap retak awal (*crack initiation*), tahap penjaralan retak (*crack propagation*), dan tahap patah statis. Dan setelah retak lelah merambat cukup jauh, maka beban yang bekerja hanya akan didukung oleh penampang tersisa yang belum retak dan akhirnya komponen akan patah (tahap *final failure*).

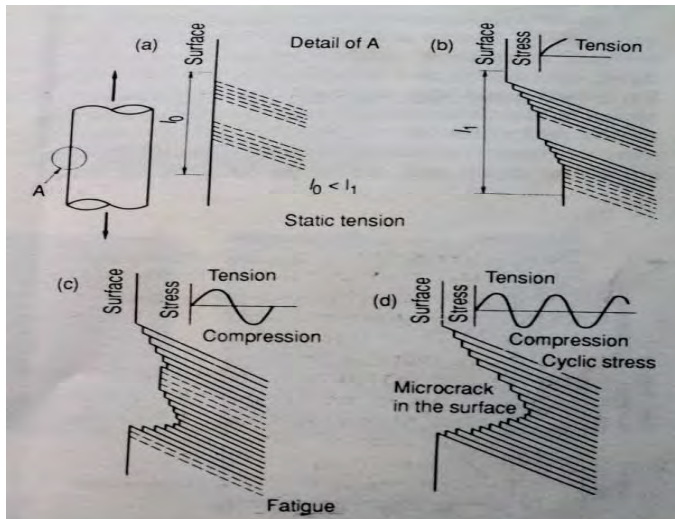


Menurut Schijve, terdapat 5 fase yang selama proses *fatigue*, yaitu : (*ASM Handbook Committee Volume 19, 2002*):

1. *Cyclic slip*
2. *Crack nucleation*
3. *Growth of microcrack*
4. *Growth of macrocrack*
5. *Final failure*

### 2.6.1 Tahap Retak Awal (*Crack Initiation*)

Awal retak biasanya dimulai dari permukaan. Hal ini terjadi karena permukaan menerima beban terbesar dan paling memungkinkan terjadinya konsentrasi tegangan yang disebabkan oleh adanya perubahan dimensi pada permukaan atau proses pengerjaan tertentu pada material. Adanya cacat dalam akan menyebabkan juga konsentrasi tegangan. Fenomena awal retak secara sederhana diberikan oleh Wood. Beberapa model diberikan dalam menjelaskan *fatigue crack* pada gambar 2.11.



**Gambar 2.11** Model Wood untuk pengintian retak (Nishida, Shin-ichi, 1992)



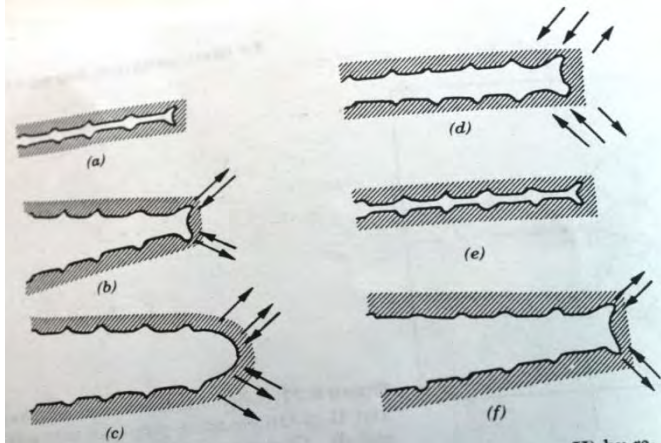


Pada beban tarik pertama, slip terjadi dengan membentuk permukaan bertingkat yang membentuk sudut  $45^\circ$  dengan sumbu tegangan. Hal ini akibat tegangan geser maksimal yang terjadi pada sudut tersebut. Pembebanan selanjutnya menyebabkan slip pada arah yang berlawanan. Slip ini terjadi pada bidang yang berdekatan dengan yang pertama. Dan selanjutnya merupakan proses pengulangan dalam pembebanan siklus yang sama. Tahap retak awal ini meliputi fase *cyclic slip*, fase pembentukan inti retak (*crack nucleation*) dan pertumbuhan retak mikro (*growth of microcrack*).

### **2.6.2 Tahap Perambatan Retak ( *Crack Propagation* )**

Perambatan retak pada suatu komponen terjadi jika tegangan maksimum pada ujung retakan berada di atas kekuatan material. Hal ini mengakibatkan peningkatan konsentrasi tegangan pada ujung retak. Awal retakan mula-mula akan menjalar pada bidang slip di dalam beberapa butir dengan kecepatan yang sangat lambat. Pengamatan secara makro tidak akan menampakkan perambatan ini. Peristiwa ini disebut perambatan retak tahap I.

Selanjutnya pertumbuhan retak pada tahap II ditandai dengan adanya striasi. Pada tahap ini pertumbuhan retak tegak lurus dengan tegangan tarik maksimum. Retakan mulai kelihatan dengan mata telanjang, oleh karena itu disebut dengan retak makro. Pengamatan retak pada penelitian biasanya difokuskan pada tahap ini. Adapun model mekanisme crack secara plastis terdapat pada Gambar 2.12 dibawah ini.



**Gambar 2.12** Mekanisme penumpulan ujung retakan secara plastis (a) beban nol (b) beban tarik kecil (c) beban tarik maksimum (d) beban-tekan kecil (e) beban tekan maksimum (f) beban tarik kecil (Callister,2007)

## 2.7 Karakteristik Patahan

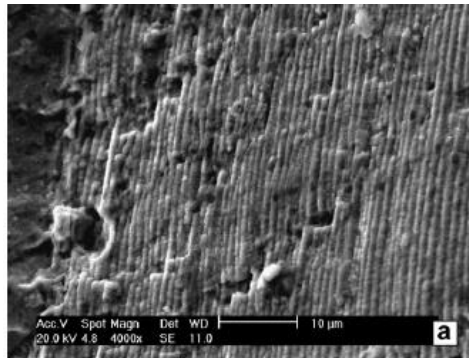
Klasifikasi dasar dari proses patah bila ditinjau dari modulus dan penyebabnya adalah patah ulet, patah getas, patah lelah (*fatigue*), dan patah merangkak (*creep/monotonic*). Masing-masing dari jenis patahan diatas memiliki karakteristik tersendiri. Berikut adalah karakteristik dasar untuk membedakan jenis patah lelah dengan patah merangkak, jenis patah getas dengan patah ulet pada skala makro, dan jenis patah getas dengan patah ulet pada skala mikro (*ASM Handbook Committee Volume 12, 2002*):

- ❖ Perbedaan karakteristik antara patah lelah dengan patah merangkak

*Beachmarks* dan striasi mengindikasikan patah lelah, sedangkan pada patah merangkak parameter tersebut tidak terlihat. Pertanda kehadiran beach marks bisa diketahui melalui pengamatan makro menggunakan *stereomicroscope*, dan striasi hanya bisa diamati pada saat dilaksanakan *SEM fractography*



(Gambar 2.13). Profil *beachmarks* dan striasi ini merupakan hasil dari fluktuasi beban yang diberikan pada benda.



**Gambar 2.13** Foto SEM yang menunjukkan *Beachmarks* dan striasi secara mikro (Poursaedi, 2005)

- ❖ Perbedaan karakteristik antara patah getas dengan patah ulet pada skala makro

Pada skala makro, patah ulet ditunjukkan dengan adanya perubahan ketinggian yang nyata sepanjang penampang potongan melintang dari benda, biasa dikenal dengan istilah *shear lips*. Kemudian pola patah getas ditunjukkan dengan permukaan patahan yang datar dan tegak lurus terhadap arah beban, serta tanpa adanya petunjuk bahwa telah terjadi deformasi plastis sebelum benda mengalami patah. Selain kedua karakteristik diatas, terdapat pola patahan gabungan (*mix-mode appearance*) baik patah getas yang bertransformasi jadi ulet ataupun patah ulet yang bertransformasi menjadi getas. Kebanyakan kasus yang terjadi adalah patah getas bertransformasi menjadi patah ulet. Contoh ciri patah ulet ditunjukkan pada Gambar 2.13.

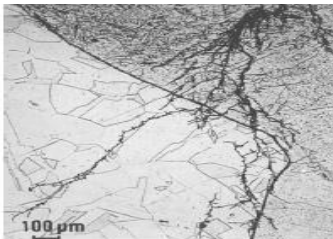
- ❖ Perbedaan karakteristik antara patah getas dengan patah ulet pada skala mikro

Pada skala mikro, patah ulet ditandai dengan adanya profil *dimple* pada permukaan patahnya yang disebabkan oleh



penjalaran retakan mikro (*micro voids coalescence*). Sedangkan patah getas ditandai dengan salah satu dari fenomena berikut:

- a. Patahan melintasi butiran atau patah transgranular, dikenal dengan nama *cleavage*, ditunjukkan pada Gambar 2.14 (a)
- b. Patahan melewati batas butir atau patah intergranular, dikenal dengan nama *intergranular embrittlement*, ditunjukkan pada Gambar 2.14 (b)



**Gambar 2.14** Retakan dengan pola rambatan (a) Transgranular (b) Intergranular (Colangelo, 1989)

## 2.8 Pengujian Kekerasan

Pada umumnya, kekerasan menyatakan ketahanan terhadap deformasi dan merupakan ukuran ketahanan logam terhadap deformasi plastik atau deformasi permanen (Dieter, 1987). Hal ini sering diartikan sebagai ukuran kemudahan dan kuantitas khusus yang menunjukkan nilai kekerasan material.

Pada pengujian kekerasan terdapat tiga jenis ukuran kekerasan, hal ini tergantung pada cara melakukan pengujian, yaitu:

1. Kekerasan goresan (*scratch hardness*),
2. Kekerasan lekukan (*indentation hardness*),
3. Kekerasan pantulan (*rebound*)

Pengujian yang sering dilakukan pada logam adalah pengujian kekerasan indentasi. Pada model ini kekerasan suatu material diukur terhadap tahanan plastis dari permukaan suatu material komponen konstruksi mesin dengan spesimen standart



terhadap *indenter*. Terdapat berbagai macam uji kekerasan indentasi, antara lain: uji kekerasan *Brinell*, *Vickers*, *Rockwell*, dan *Knoop*.

Kekerasan aluminium yang cenderung kecil, sehingga dengan sedikit gaya saja dapat merubah bentuk logam. Maka metode pengujian kekerasan yang cocok adalah dengan menggunakan *Vickers Hardness Testing*.

### 2.8.1 Uji Kekerasan Vickers

Uji kekerasan *vickers* menggunakan indenter piramida intan yang pada dasarnya berbentuk bujursangkar. Besar sudut antar permukaan-permukaan piramida yang saling berhadapan adalah  $136^\circ$  (Dieter, 1987).

Angka kekerasan *vickers* didefinisikan sebagai beban dibagi luas permukaan indentasi. Pada prakteknya, luas ini dihitung dari pengukuran mikroskopik panjang diagonal jejak. VHN dapat ditentukan dari persamaan berikut :

$$\text{VHN} = \frac{2F \sin \frac{\theta}{2}}{d^2} = 1,8544 \frac{F}{d^2} \quad (2.6)$$

Dimana :

F : beban yang dipergunakan (gram)

d : panjang diagonal rata-rata ( $\mu\text{m}$ )

$\theta$  : sudut antar permukaan intan yang berlawanan

### 2.9 Scanning Electron Microscopy (SEM)

*Scanning Electron Microscopy* (SEM) adalah mikroskop yang menggunakan elektron sebagai pengganti cahaya untuk melihat benda dengan resolusi yang tinggi dibandingkan dengan mikroskop optik. Analisa pada SEM digunakan untuk mengetahui mikrostruktur. Berkas sinar elektron dihasilkan dari filamen yang dipanaskan yang disebut *electron gun* . Sebuah ruang vakum diperlukan untuk preparasi spesimen. Cara kerja SEM adalah



gelombang elektron yang dipancarkan *electron gun* terkondensasi pada lensa kondensor dan terfokus sebagai titik yang jelas oleh lensa objektif. *Scanning coil* yang diberi energi akan menghasilkan medan magnetik bagi sinar elektron. Berkas sinar elektron yang mengenai spesimen menghasilkan elektron sekunder dan kemudian dikumpulkan oleh detektor sekunder atau detektor *backscatter*. Pada permukaan *Cathode Ray Tube (CRT)* akan menghasilkan gambar yang terdiri dari ribuan titik dalam berbagai intensitas sebagai topografi gambar. (Kroschwits, 1990). Pada layar akan diproyeksikan berkas elektron yang sebelumnya dikonsentrasikan pada spesimen yang bayangannya diperbesar dengan lensa objektif (Gabriel, 1993).

## 2.10 PENGUKURAN GETARAN

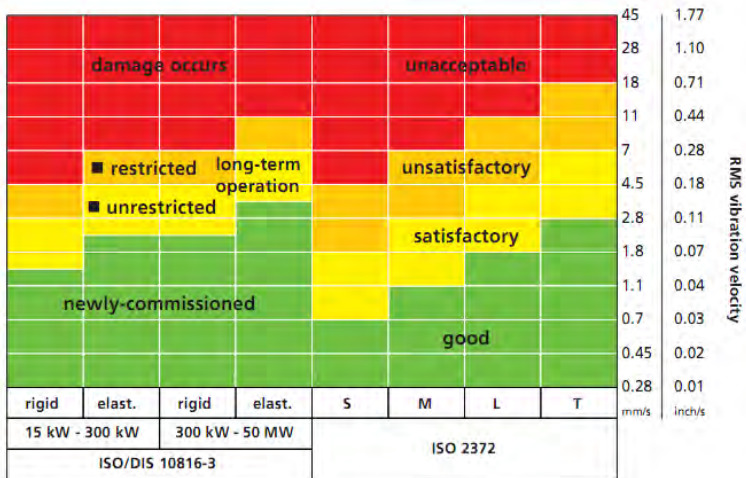
Pengukuran getaran pada suatu mesin secara normal diambil pada bearing dari mesin tersebut. Transduser sebaiknya harus ditempatkan sedekat mungkin dengan bearing mesin karena melalui bearing tersebut gaya getaran dari mesin ditransmisikan. Gerakan bearing adalah merupakan hasil reaksi gaya dari mesin tersebut. Disamping karakteristik getaran seperti Amplitudo, frekuensi dan phase, ada karakteristik lain dari getaran yang juga mempunyai arti yang sangat penting yaitu arah dari gerakan getaran, hingga perlu bagi kita untuk mengukur getaran dari berbagai arah.

Pengalaman menunjukkan bahwa ada tiga arah pengukuran yang sangat penting yaitu horizontal, vertikal, dan axial. Arah horizontal dan vertikal bearing disebut dengan arah radial. Arah pengukuran ini biasanya didasarkan pada posisi sumbu transduser terhadap sumbu putaran dari shaft mesin. Arah ini juga sangat penting artinya dalam analisa suatu getaran.

Dalam membicarakan getaran kita harus mengetahui batasan - batasan level getaran yang menunjukkan kondisi suatu mesin, apakah mesin tersebut masih baik (layak beroperasi) ataukah mesin tersebut sudah mengalami suatu masalah sehingga memerlukan perbaikan. (Fajar, 2011).



Vibration severity according to ISO/DIS



**Gambar 2.15** Parameter kondisi getaran berdasarkan ISO 2372 (International Standart ISO 2372, 1974).



Vibration Severity Range Limits (Velocity) From ISO 2372		Vibration Severity Ranges for Machines Belonging to:			
In/Sec (PK)	MM/Sec (RMS)	Class I < 20 HP	Class II 20-100 HP	Class III >100 HP	Class IV >100 HP
0.015	0.28	A	A	A	A (Good)
0.025	0.45				
0.039	0.71				
0.062	1.12	B	B	B	B (Allowable)
0.099	1.80				
0.154	2.80				
0.248	4.50	C	C	C	C (Tolerable)
0.392	7.10				
0.617	11.2				
0.993	18.0	D	D	D	D (Not Permissible)
1.540	28.0				
2.480	45.0				
3.940	71.0				

**A: Good**  
**B: Allowable**  
**C: Tolerable**  
**D: Not Permissible**

**Suggested Classifications:**

**Class I:** Small (up to 15kW) machines and subassemblies of larger machines.

**Class II:** Medium size (15kW to 75kW) machines without special foundations, or machines up to 300kW rigidly mounted on special foundations.

**Class III:** Large rotating machines rigidly mounted on foundations which are stiff in the direction of vibration measurement.

**Class IV:** Large rotating machines mounted on foundations which are flexible in the direction of vibration measurement.

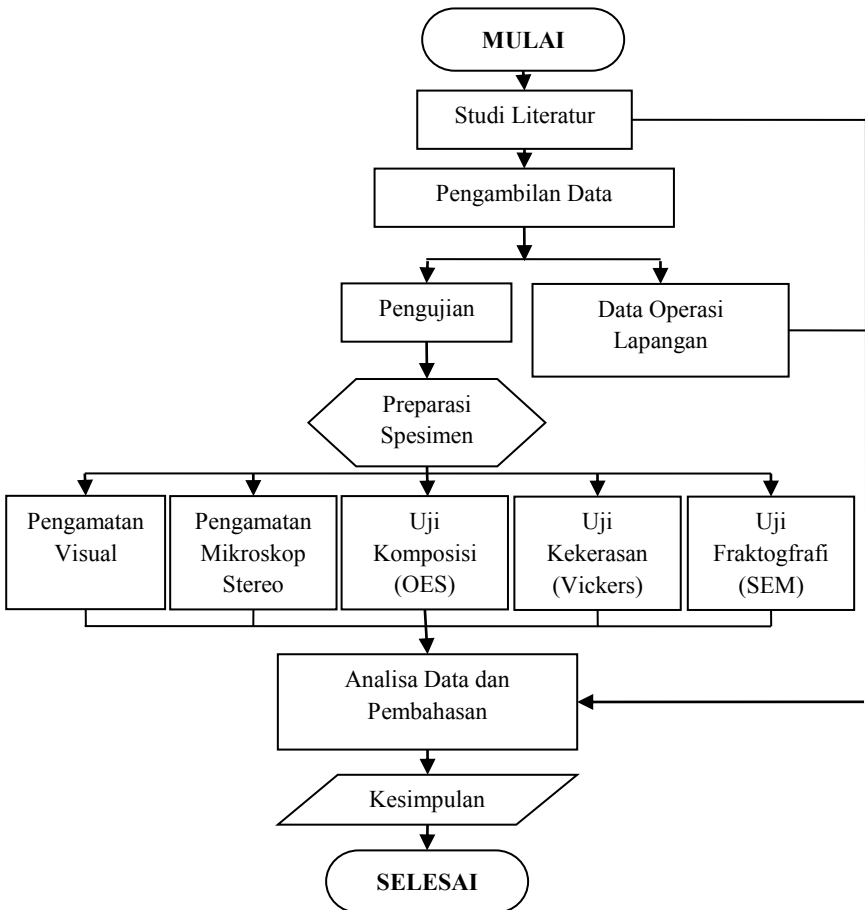
**Gambar 2.16** Range parameter getaran berdasarkan ISO 2372 (International Standart ISO 2372, 1974).



## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1. Diagram Alir Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini dilakukan beberapa pengujian seperti ditunjukkan dalam Gambar 3.1 dibawah ini.



**Gambar 3.1** Diagram Alir Penelitian.



### 3.2 Metode Penelitian

Metode Penelitian yang digunakan dalam penelitian kali ini antara lain studi lapangan, pengujian dan studi literature. Adapun hal-hal yang mencakup penelitian antara lain:

1. Studi lapangan  
Metode ini mengacu pada pencarian informasi tentang komponen yang akan diteliti beserta informasi tentang kegagalan yang terjadi pada komponennya dengan cara terjun langsung ke lapangan yaitu PT. Petrokimia Gresik, dan berdiskusi dengan dosen mata kuliah, dosen pembimbing, dan pihak PT. Petrokimia Gresik yang ahli dibidangnya.
2. Studi Literatur  
Metode studi literatur mengacu pada buku-buku, jurnal-jurnal penelitian, dan situs industri yang mempelajari tentang permasalahan analisa kegagalan pada kopling fluida.
3. Pengujian  
Metode ini dilakukan dengan pengujian langsung sesuai dengan prosedur dan metode yang ada. Adapun pengujian yang diperlukan dalam eksperimen ini yaitu : pengamatan bentuk *crack* dengan mikroskop optik dan SEM, pengamatan mikro dengan SEM, uji komposisi dengan menggunakan spektrometer dan uji kekerasan untuk mengetahui nilai kekerasan pada material kopling fluida..

### 3.3 Material yang digunakan

#### 1. Material

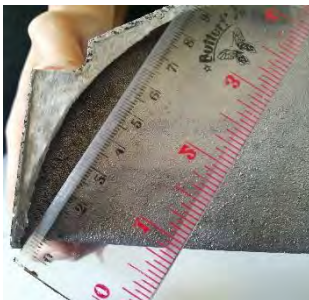
Pada tanggal 01 Oktober 2015 ditemukan kopling fluida pada mesin pengering pupuk di Pabrik NPK 3 pecah menjadi tiga bagian yang diperlihatkan pada gambar 3.2.



**Gambar 3.2** Komponen kopling fluida yang terpecah menjadi tiga bagian

## 2. Spesimen

Spesimen yang digunakan dalam penelitian ini yaitu komponen kopling fluida yang sudah retak/ gagal diperlihatkan pada gambar 3.3.



**Gambar 3.3** Permukaan pecahan yang di indikasi ada *initial crack*

## 3.4 PERALATAN

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

### 1. Penggaris

Digunakan untuk mengukur spesimen.



2. Alat Pemotong  
Digunakan untuk memotong spesimen.
3. Kamera Digital  
Digunakan untuk mendapatkan informasi kegagalan secara makro.
4. Mesin OES (*Optical Emission Spectroscopy*)  
Digunakan untuk mengetahui komposisi material uji
5. Hardness Test  
Digunakan untuk mengetahui nilai kekerasan dari material uji.
6. Amplas grade 80 hingga 2000  
Digunakan untuk preparasi pengujian mikroskop optik.
7. Mesin Polish  
Digunakan untuk preparasi pengujian mikroskop optik.
8. Larutan Etsa  
Digunakan untuk preparasi pengujian mikroskop optik.
9. Resin  
Digunakan untuk preparasi pengujian mikroskop optik.
10. Mesin SEM –EDX  
Digunakan untuk mendapatkan informasi kegagalan secara topografi permukaan.

### **3.5 TAHAPAN PENELITIAN**

#### **3.5.1 Review Dokumen Perusahaan**

Review dokumen perusahaan dilakukan untuk mendapatkan data data perusahaan yang berkaitan dengan kopling fluida sebagai pendukung hasil penelitian, berikut data yang harus diambil, yaitu :

1. Desain kopling fluida
2. Data operasi
3. Spesifikasi material
4. *Maintenance record*



### 3.5.2 Preparasi Spesimen

Tahap Persiapan ini diperlukan sebelum melakukan pengujian untuk menentukan penyebab kegagalan kopling fluida pada PT Petrokimia Gresik. Persiapan ini berupa proses *cutting* dan *sectioning*.

Proses pemotongan dilakukan pada bagian ujung pecahan kopling fluida yang terindikasi adanya *initial crack* dan bagian yang jauh dari *crack*. Specimen yang terindikasi adanya *initial crack* serta bagian yang jauh dari *crack* akan diuji sbagai perbandingan antara material yang baru dengan material yang sudah retak/ pecah.

### 3.5.3 Uji Komposisi

Pengujian komposisi kimia adalah untuk mengetahui komposisi kimia yang terdapat pada komponen yang mengalami kegagalan. Pada identifikasi komposisi kimia menggunakan alat *Optical Emission Spectroscopy (OES)* untuk mengetahui komposisi yang ada pada kopling fluida.

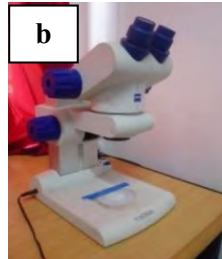
### 3.5.4 Pengamatan Makroskopik

Pengamatan makro dilakukan untuk mengetahui bentuk, tampilan dan lokasi komponen yang mengalami kegagalan secara makro. Pengamatan makro dilakukan menggunakan kamera dan digital dan mikroskop stereo.

Adapun perlakuan terhadap sampel material sebagai berikut:

1. Melakukan pengambilan fotografi dengan kamera digital untuk mendapatkan informasi bentuk dari kegagalan secara makro.

Pengamatan melalui *stereomicroscope* terhadap sampel material dengan beberapa kali perbesaran untuk mendapatkan profil makronya



**Gambar 3.4** (a) Kamera merk Canon tipe SLR.  
(b) Stereomicroscope

### 3.5.5 Pengamatan Mikroskopik

Pada pengamatan Mikroskopik dilakukan dengan menggunakan alat, yaitu :

#### *Scanning Elektron Mikroskop (SEM)*

SEM (*Scanning Electron Microscope*) adalah sebuah mikroskop elektron yang didesain untuk menganalisa permukaan dari objek solid secara langsung.

Langkah-langkah yang dilakukan dalam *fractography* menggunakan SEM adalah sebagai berikut :

1. Spesimen yang telah dipotong dibersihkan dengan hati-hati menggunakan *blower* untuk menghilangkan debu dan pengotor ringan lainnya.
2. Spesimen diletakkan diatas holder yang sebelumnya telah dilekatkan dengan *carbon tape*. *Carbon tape* berfungsi untuk melekatkan *holder* dengan sampel
3. Spesimen yang telah berisi *holder* dimasukkan kedalam mesin SEM pada gambar 3.5 dan siap dilakukan proses pengamatan. Pada layar komputer akan tampak permukaan spesimen dengan berbagai perbesaran yang bisa diatur sesuai keinginan.



**Gambar 3.4** : Mesin SEM –EDAX FEI type Inspect S-50

### **3.5.6 Uji Kekerasan**

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui distribusi dengan menggunakan vickers. Berikut prosedur penggunaan mesin kekerasan:

1. Permukaan specimen dibersihkan
2. Memasang indenter piramida intan
3. Menempatkan pemegang dan beban pada mesin
4. Menaikkan meja spesimen dengan memutar *wheel* sehingga indenter melakukan penetrasi pada specimen hingga jarum penunjuk kecil berada sejajar dengan jarum penunjuk utama.
5. Merilis beban sehingga kondisi pembebanan mayor hingga beberapa saat.

Pada saat pembebanan sudah berhenti, angka yang tertera pada mesin terbaca dengan besaran hardness vickers number (HV).



---

### 3.6 RANCANGAN PENELITIAN

**Tabel 3.1.** Rancangan penelitian

<b>Bahan</b>	<b>Pengujian SEM</b>	<b>Pengujian Spectometri</b>	<b>Uji Hardness</b>
Bagian crack	√	-	√
Bagian bukan crack	-	√	√



## BAB IV

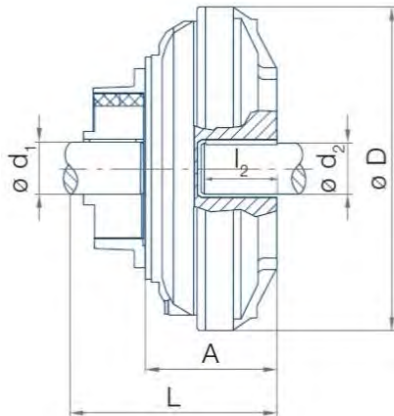
### ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 ANALISA DATA

##### 4.1.1 Record Kopling fluida

Kopling Fluida pada mesin pengering pupuk NPK 3 pada PT. Petrokimia Gresik tanggal 01 Oktober 2014 harus diganti. Hal ini dikarenakan Kopling Fluida pada mesin pengering pupuk NPK 3 PT. Petrokimia Gresik dengan *part number* 18M3114 pecah menjadi tiga bagian. Kopling Fluida dipasang pada tahun 2010. pada Maintenance Record terakhir, tanggal 05 Maret 2014 dilakukan pergantian oli pada Kopling Fluida. Inspeksi yang dilakukan pada mesin pengering pupuk ini adalah Inspeksi getaran mesin yang dilakukan secara berkala pada tiap bulannya.. Komponen ini menggunakan material **AI EN AB – AISi11Cu2(Fe)**.

Berikut data-data kopling fluida mencakup spesifikasi kopling fluida, desain kopling fluida, operasi dan dimensi diperlihatkan pada Gambar 4.1, Tabel 4.1 dan Tabel 4.2



**Gambar 4.1** Desain kopling fluida 18M3114 PT. Petrokimia Gresik



**Tabel 4.1** Dimensi kopling fluida 18M3114 PT. Petrokimia Gresik

Dimensi	A (mm)	D (mm)	L (mm)	d <sub>1</sub> (mm)	d <sub>2</sub> (mm)
	269	634	385	130	110

**Tabel 4.2** Data Operasi kopling fluida 18M3114 PT. Petrokimia Gresik

Daya	200 kw
Kecepatan putar	1.500 rpm

#### 4.1.2 Hasil OES (*Optical Emmision Spectroscopy*)

Tabel 4.1 Menunjukkan data hasil pengujian Spektrometer untuk mengetahui komposisi kimia yang terkandung pada Material **Al EN AB – AlSi11Cu2(Fe)**.

**Tabel 4.3.** Hasil Pengujian *Optical Emmision Spectroscopy*

Unsur	Komposisi (%)	Al EN AB – AlSi11Cu2(Fe)
Al	76.0	Balance
Si	10.8	12.0 Max
Fe	0.782	1.0 Max
Cu	7.55	2.5 Max
Mn	0.2	0.55 Max
Mg	0.203	0.3 Max



Zn	1.61	1.7 Max
Cr	0.107	0.15 Max
Ni	0.236	0.45 Max
Pb	0.244	0.25 Max
Sn	> 0.250	0.15 Max

Berdasarkan Tabel 4.2 menunjukkan hasil komposisi kimia dari *Fluid Coupling*. Dimana terdapat perbedaan komposisi pada tembaga (Cu), mangan (Mn), nikel (Nikel), dan tin (Sn) bila dibandingkan dengan standart.

Penambahan unsur Cu akan meningkatkan kekuatan dan kekerasan dari suatu material.

Penambahan unsur Mn adalah zat pengotor pada pengecoran aluminium paduan, namun ketika kandungan Mn < 0.5% tidak akan memberikan manfaat yang signifikan.

Penambahan unsur Ni memiliki ketahanan terhadap temperature tinggi dan mengurangi koefisien ekspansi termal.

Penambahan unsur Sn pada Aluminium paduan berguna untuk menaikkan sifat tahan aus. (Kaufman dan Rooy, 2004).

Secara garis besar efek penambahan unsur tersebut tidak menyebabkan terjadinya kegagalan dalam kopling fluida, karena sebagian besar komposisi ini telah memenuhi standart EN AC 46100 atau Al EN AB – AlSi11Cu2(Fe) yang sering digunakan sebagai komponen kopling fluida. (Pristi, 2010).

#### 4.1.3 Hasil Perhitungan Analisa Tegangan

Dari hasil perhitungan menggunakan metode Tresca didapatkan hasil tegangan yang bekerja pada kopling fluida ini.



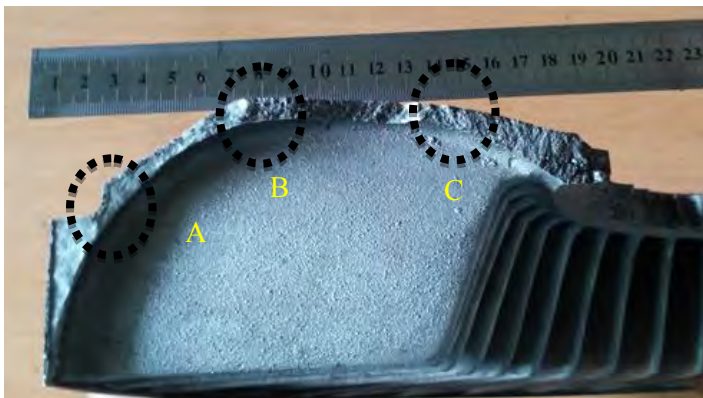
Diketahui tegangan yang bekerja pada kopling fluida ini sebesar 196,88 MPa. Bila dibandingkan dengan tegangan standart sebesar 140 MPa. Sehingga tegangan yang bekerja pada kopling fluida ini melebihi standart yang diizinkan.

$$\sigma_1 > \sigma_y \quad (4.1)$$

$$196.88 \text{ MPa} > 140 \text{ MPa} \quad (4.2)$$

#### 4.1.4 Hasil Fraktografi

Pengamatan secara makro dilakukan untuk mengetahui bentuk, tampilan, dan lokasi kegagalan yang terjadi. Dari hasil pengamatan visual secara makro menggunakan kamera SLR pada daerah komponen *Fluid Coupling* yang mengalami kerusakan terlihat pada Gambar 4.2. Terlihat kegagalan pada *Fluid Coupling* dibagi menjadi 3 daerah yaitu retak awal (*initial crack*), penjaralan retak (*crack propagation*), dan retak akhir (*final crack*).



**Gambar 4.2** Pembagian daerah retak awal (a), penjaralan retak (b), dan daerah patah akhir (c) pada material yang mengalami kegagalan

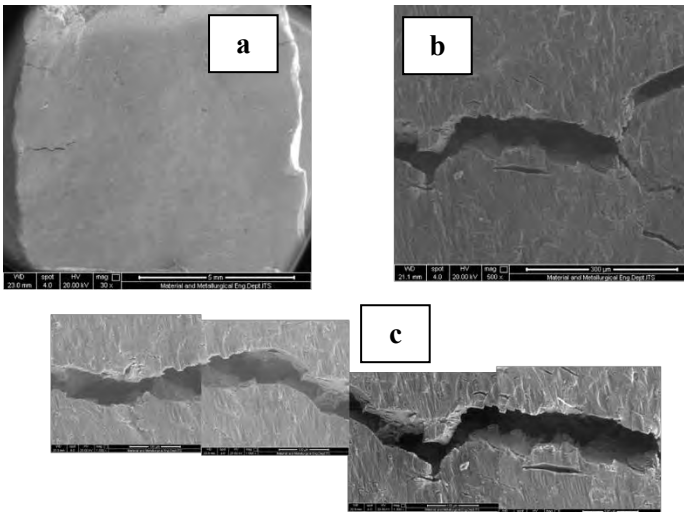


Pada Gambar 4.3 (a) adalah daerah *initiation crack* yang ditandai dengan permukaan yang terlihat terang dan halus bila dibandingkan dengan daerah b yang merupakan daerah rambatan dari retak, gambar 4.3 dengan perbesaran 20x diambil dengan menggunakan *stereomicroscope* dan SEM pada gambar 4.4. Dari sini terlihat bahwa kopling fluida ini mengalami *fatigue crack* dengan arah retakan yang tegak lurus dari beban dan menerima beban secara fluktuasi. Pada gambar 4.4 diperlihatkan daerah *initial crack* dengan berbagai perbesaran menggunakan SEM, gambar 4.4 (b) memperlihatkan bentuk *initial crack* yang terjadi dengan perbesaran 500x.





Gambar 4.3 Perbesaran pada daerah *initial crack* (a) dan daerah *crack propagation* (b) diambil dengan *stereomicroscope* perbesaran 20x.

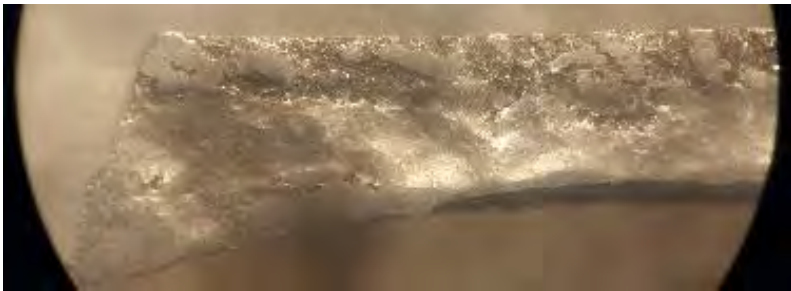


**Gambar 4.4:** Hasil SEM pada material kopling fluida dalam berbagai macam perbesaran (a) Perbesaran 50x pada sampel yang

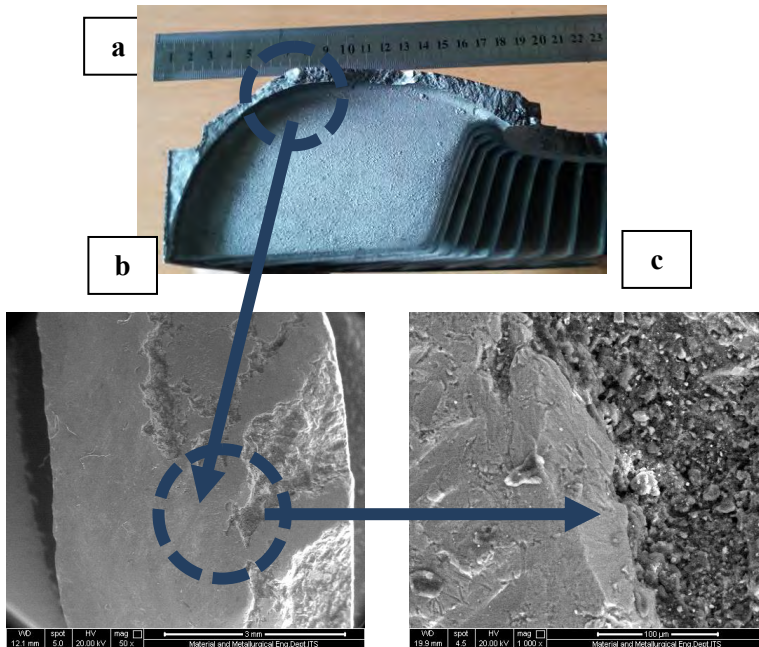


mengalami kegagalan (b) Perbesaran 500x pada daerah awal *initial crack* (c) Perbesaran 1000x pada daerah rambatan *initial crack*

Pada gambar 4.2 (b) adalah daerah dari rambatan retak (*crack propagation*) pada kopling fluida yang mengalami kegagalan. Pada hasil pengamatan secara mikro dengan menggunakan SEM pada Gambar 4.6 (c) terlihat permukaan yang berwarna lebih gelap dan adanya perbedaan ketinggian bila dibandingkan dengan daerah *initial crack*, daerah ini berbentuk berupa butir-butir kasar (*coarse grains*) dan pola patahan gabungan (*mix-mode appearance*) yang diduga terjadi dari patah getas yang bertransformasi menjadi patah ulet.



**Gambar 4.5** Perbesaran pada daerah *crack propagation* diambil dengan *stereomicroscope* perbesaran 20x



**Gambar 4.6** Daerah letak *crack propagation* (a). Hasil SEM pada material kopling fluida dalam berbagai macam perbesaran (b) Perbesaran 50x pada sampel yang mengalami kegagalan, (c) perbesaran 1000x pada daerah patah getas

Pada gambar 4.2 (c) adalah daerah dari patah akhir (*final crack*) pada kopling fluida yang mengalami kegagalan. Dengan permukaan yang kasar dengan butir-butir yang kasar (*coarse grains*) yang terlihat pada hasil pengamatan secara makro dengan menggunakan *stereomicroscope* pada Gambar 4.7. hal ini berbeda dengan daerah pada gambar 4.2 (b) yang memiliki ciri dari pola

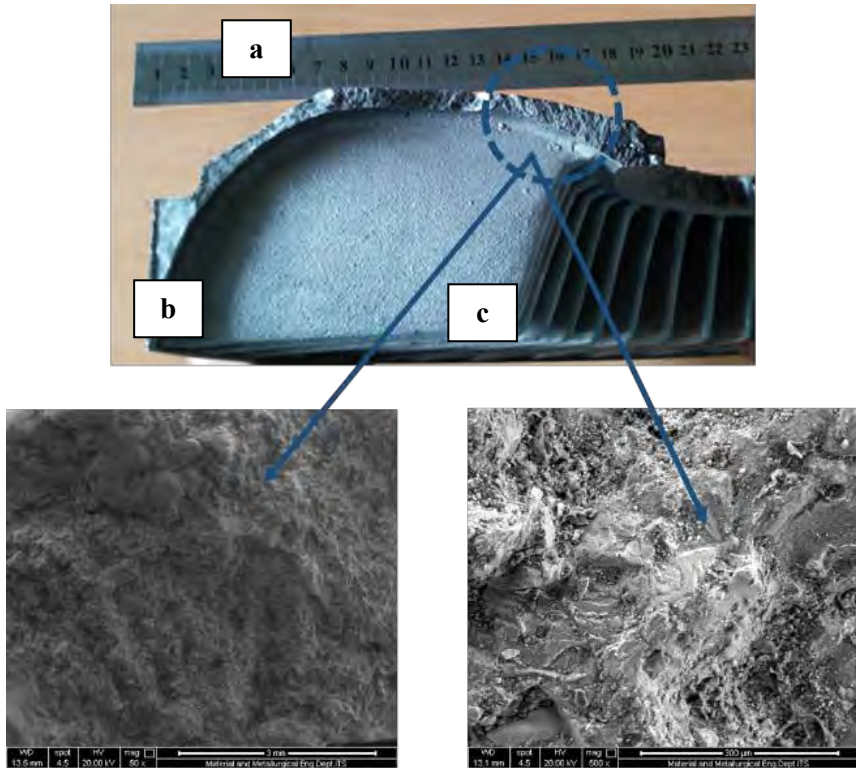




patah gabungan. Daerah gambar 4.2 (c) tidak memiliki ciri tersebut, hal ini mengindikasikan bahwa rambatan ini adalah rambatan akhir pada saat komponen tidak lagi bisa menerima beban yang diberikan dengan luasan penampang yang tersisa sehingga terjadi kegagalan pada komponen ini.



**Gambar 4.7** Perbesaran pada daerah patah akhir dengan *stereomicroscope* dengan perbesaran 20x

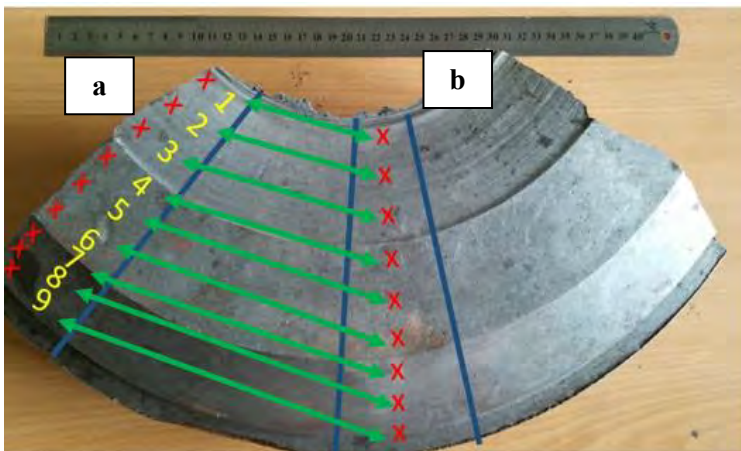


**Gambar 4.8** Daerah letak *final crack* (a). Hasil SEM pada material kopling fluida dalam berbagai macam perbesaran (b) perbesaran 50x pada rambatan patah akhir, (c) Perbesaran 500x pada daerah patah akhir



#### **4.1.5 Hasil Pengujian Kekerasan Vickers**

Pengujian Hardness ini diperlukan untuk mengetahui distribusi kekerasan dari daerah kopling fluida yang mengalami kegagalan dan yang berada jauh dari kegagalan yang diperlihatkan pada gambar 4.10. Pengujian ini menggunakan ASTM E92-82, Indentasi dilakukan pada daerah yang mengalami kegagalan dengan jumlah titik indentasi 11 titik dengan beban yang diberikan sebesar 100-kgf. Pada tabel 4.3 diperlihatkan nilai kekerasan yang di dapat pada daerah yang mengalami kegagalan dan daerah yang jauh dari kegagalan, serta grafik distribusi kekerasan dari kopling fluida terlihat pada gambar 4.10.

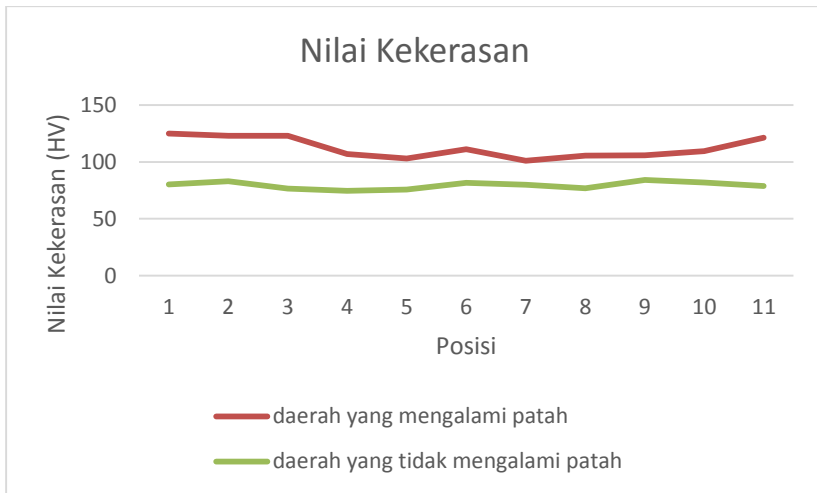


**Gambar 4.9** (a) Posisi indentasi pada material daerah patahan (b) Posisi indentasi pada material daerah jauh dari patahan



**Tabel 4.4** Nilai kekerasan vickers komponen kopling fluida

indentasi	daerah yang mengalami patah (HV)	daerah yang tidak mengalami patah (HV)	Kekerasan Standart (HV)
1	125	80.4	90
2	123	83.2	
3	123	76.6	
4	107	74.7	
5	103.1	75.8	
6	111.2	81.6	
7	101.2	80.1	
8	105.6	76.8	
9	106	84.2	
10	109.6	81.9	
11	121.3	78.96	



**Gambar 4.10** Grafik distribusi kekerasan pada daerah kopling fluida yang mengalami patahan dan yang berada jauh dari patahan

Dari data distribusi yang didapat pada pengujian pada daerah kegagalan ini didapat nilai rata-rata kekerasan sebesar 104.18 HV, sedangkan pada daerah yang jauh dari kegagalan didapat nilai rata-rata kekerasan sebesar 79.48 HV. Dari data yang didapat terlihat bahwa komponen ini mengalami kenaikan kekerasan pada daerah yang mengalami patahan bila dibandingkan dengan daerah yang berada jauh dari patahan.

## 4.2 PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil perhitungan dan hasil pengujian yang telah dilakukan kegagalan yang terjadi pada kopling fluida PT Petrokimia Gresik ini disebabkan oleh tegangan yang bekerja pada kopling fluida ini melebihi standart yang diizinkan.



Berdasarkan hasil uji kekerasan menggunakan Vickers menunjukkan terjadi kenaikan kekerasan pada daerah yang patahan bila dibandingkan dengan daerah yang jauh dari patahan. Hal ini dikarenakan tegangan yang bekerja pada daerah patahan sangat tinggi dan melebihi standart yang diizinkan.

Menurut Zhang, (2011) tegangan yang tinggi mengakibatkan semakin mudah terjadinya *crack*.

Berdasarkan pengamatan secara visual, kegagalan ini memperlihatkan beberapa hal, yaitu :

1. *Initial Crack*, merupakan retak awal yang ditandai dengan permukaan yang terlihat terang dan halus. Menurut Nishida Shin-ichi (1992). Awal retak biasanya dimulai dari permukaan. Hal ini terjadi karena permukaan menerima beban terbesar dan paling memungkinkan terjadinya konsentrasi tegangan yang disebabkan oleh adanya perubahan dimensi pada permukaan atau proses pengerjaan tertentu pada material. Adanya cacat dalam akan menyebabkan juga konsentrasi tegangan.
2. *Crack Propagation*, merupakan penjaralan retak dengan permukaan yang berwarna lebih gelap dan adanya perbedaan ketinggian yang terlihat secara makro bila dibandingkan dengan daerah initial crack, dan pola patahan gabungan (*mix-mode appearance*) yang diduga terjadi dari patah getas yang bertransformasi menjadi patah ulet. (Callister, 2007).
3. *Final Crack*, merupakan daerah rambatan akhir dengan permukaan yang kasar dengan butir-butir yang kasar (*coarse grains*).

Berdasarkan hasil perhitungan tegangan dan hasil pengujian yang telah dilakukan, faktor penyebab kegagalan nya adalah *fatigue*



akibat *overload*, hal ini dibuktikan dengan hasil perhitungan yang menunjukkan tegangan yang terjadi pada kopling fluida melebihi dari tegangan yang diizinkan. Menurut Brooks (2002) faktor yang menyebabkan kegagalan yang sering terjadi pada dunia industry dapat diklasifikasikan menjadi beberapa aspek, lihat pada halaman 11.



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **1. Kesimpulan**

Berdasarkan serangkaian percobaan yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa :

1. Faktor yang menyebabkan kegagalan komponen kopling fluida pada mesin pengering pupuk PT. Petrokimia Gresik yaitu *fatigue failure*.
2. Mekanisme kegagalan kopling fluida ini terjadi karena komponen ini bekerja melebihi standart yang diizinkan.

#### **2. Saran**

1. Melakukan monitoring secara langsung pada kopling fluida agar dapat memantau kinerja pada komponen ini, sehingga ketika mengalami penurunan kinerja dapat segera dilakukan *maintenance*
2. Melakukan pemeriksaan berkala pada komponen ini agar dapat memastikan komponen tidak dalam keadaan cacat.
3. Melakukan tindakan ketika hasil Inspeksi Vibrasi menunjukkan adanya perubahan getaran.
4. Jika terdapat komponen yang mengalami cacat permukaan atau sebaiknya segera dilakukan pergantian komponen agar tidak memberhentikan proses produksi.
5. Berhati-hati pada saat proses pemasangan dan pelepasan untuk menghindari adanya *initiation crack* yang terbentuk.



*Laporan Tugas Akhir*  
*Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS*

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **DAFTAR PUSTAKA**

- \_\_\_\_\_. 2007. **Annual Report PT Petrokimia Gresik.**  
Gresik : PT Petrokimia Gresik.
- \_\_\_\_\_. 2002. **ASM Handbook Vol.9 Metallographic and Microstructure.** Material Park. Ohio. USA : ASM International.
- \_\_\_\_\_. 2002. **ASM Handbook Vol.12 Fractography.** Material Park. Ohio. USA : ASM International.
- \_\_\_\_\_. 2002. **ASM Handbook Vol.19 Fatigue and Fracture.** Material Park. Ohio. USA : ASM International.
- \_\_\_\_\_. 2002. **ASTM E140-02 Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness.** USA : ASTM International.
- \_\_\_\_\_. 2002. **ASTM E92-82 Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials.** USA : ASTM International.
- \_\_\_\_\_. 2009. **Catalog MD 10.1 Flender Couplings.** China : Siemens
- \_\_\_\_\_. 2008. **Fluid Coupling FLUDEX Series.** China : Siemens.



- \_\_\_\_\_. 1974. **International Standart ISO 2372.** Switzerland : ISO Standarts.
- . \_\_\_\_\_. 2008. **Fluid Coupling VOITH Series.** Germany : VOITH Engineered Reliability.
- \_\_\_\_\_. 1998. **Mechanical Vibration – Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-Rotating Parts.** International Standart : ISO 10816-3
- Ahmad, Zaki. 2012. **Aluminium Alloys - New Trends in Fabrication and Applications.** Croatia : InTech.
- Kaufman, J.Gilbert. 2004. **Aluminum Alloy Castings.** Schaumburg : American Foundry Society.
- Mondolfo, Lucio. F. 1976. **Aluminum Alloys: Structure and Properties.** Boston : Butterworth & Co.
- Avner, Sidney H. 1974. **Introduction To Physical Metallurgy.** Singapore : McGraw-Hill Book Co.
- Suga, Kyokatsu. 1997. **Dasar Perencanaan dan Pemilihan Elemen Mesin.** Jakarta. Pradnya Paramita
- Bradburry E. J. 1991. **Dasar Metalurgi Untuk Rekayasawan.** Indonesia : PT Gramedia Pustaka Utama.
- Callister, William. 2007. **Material Science and Engineering An Introduction.** New York : John Wiley & Sons, Inc.

- Colangelo, V.J. 1989. **Analysis of Metallurgical Failures Second Edition**. Singapore : John Wiley & Sons, Inc.
- Courtney, Thomas H. 1990. **Mechanical Behavior Of Materials**. Singapore : McGraw-Hill Book Co.
- Dieter, George E. 1987. **Metalurgi Mekanik**. Jakarta : Erlangga.
- Kvačak, Tibor. 2011. **Aluminium Alloys, Theory and Applications**. Croatia : InTech.
- Rathi. 2011. **Causes of Coupling Failures**. China : Transpower Private Limited.
- Wattner, K. W. 1965. **High Speed Coupling Failure Analysis**. Texas : Texas Customs Builder, Inc.
- Nishida, Shin-ichi.1992. **Failure Analysis in Engineering Application**. Jordan Hill. Oxford. Butterworth-Heinemann Ltd.
- R. Brooks, Charlie and Choudhury, Ashok. 2002. **Failure Analysis of Engineering Materials**. New York : McGraw-Hill.
- Ismail, B. 2011. **Torsional Deformation And Fatigue Behaviour Of 6061 Aluminium Alloy**. Malaysia: School of Materials and Mineral Resources Engineering, University Sanis Malaysia.



\_\_\_\_\_. 2010. **Chemical Composition And Mechanical Properties Of Aluminum Alloy EN AC 46100.** Italy : M. dei F.lli Monticelli s.r.l. - Gruppo Montifin s.r.l.

Bonollo, Franco. 2013. **Database on Mechanical Properties of Al Foundry Alloys.** Italy : University of Padova.

\_\_\_\_\_. 2010. **Aluminium alloy EN AB-46100.** Swedia : Stena Alumunium.


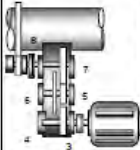
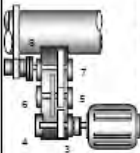
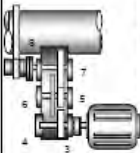
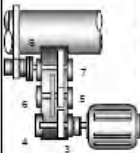
Warmuzek, Malgorzata. 2004. **Alumunium-Silicon Casting Alloys : Atlas of Microfractographs.** America : ASM International.

Mott, Robert L. 2009. **Elemen-elemen Mesin dalam Perancangan Mekanis.** Yogyakarta : ANDI

## LAMPIRAN


### A. Data Vibrasi Kopling Fluida

#### • Bulan Juli

		KADEP INSPEKSI TEKNIK - INSPEKSI TEKNIK KHUSUS GETARAN MESIN-MESIN KRITIS PABRIK II BULAN JULI 2014					Area : Unit NPK III Tol. diukur : 10 Juli 2014 Halaman : 9 dari 16	
ALAT UKUR : CSI 2130 / 2117A STANDAR GETARAN : ISO - 10816-3		TITIK UKUR	Overall Vibration (mm/s-RMS)				Over All Severity	KONDISI GETARAN & REKOMENDASI
DATA MESIN			HOR	VER	AXIAL	P Vals Gm/s		
<b>18 M 3112</b> Granulator:  Daya : 132 kW Put. Motor : 1460 rpm Gearbox : 1460 / rpm  Rigid Foundation  		1	1.41	0.94	1.14	0.35	A	* Pengukuran bulan Juni 2014.
		2	1.68	0.99	1.21	0.83	A	
		3	0.75	0.52	1.37	0.35	A	
		4	1.07	0.70	1.21	0.44	A	
		5	—	—	—	—	—	
		6	—	—	—	—	—	
		7	—	—	—	—	—	
		8	1.02	0.41	1.28	0.06	A	
		<b>18 M 3114</b> Dryer:  Daya : 185 kW Put. Motor : 1485 rpm Gearbox : 1485 / rpm  Rigid Foundation  		1	1.24	1.12	1.48	0.46
2	1.44			0.86	1.43	0.49	A	
3	0.97			0.52	1.43	0.68	A	
4	1.15			0.57	0.66	0.58	A	
5	—			—	—	—	—	
6	—			—	—	—	—	
7	0.00			0.00	0.00	0.1	—	
8	1.11			0.36	1.27	0.1	A	
<b>18 M 3114</b> Dryer:  Daya : 185 kW Put. Motor : 1485 rpm Gearbox : 1485 / rpm  Rigid Foundation  				1	8.68	2.56	8.78	0.67
		2	7.10	1.75	2.33	0.52	C	
		3	1.62	0.67	1.42	0.18	A	
		4	1.27	0.69	0.66	0.18	A	
		5	—	—	—	—	—	
		6	1.40	0.70	0.94	0.28	A	
		7	—	—	—	—	—	
		8	0.98	0.52	0.72	0.10	A	
		<b>18 M 3114</b> Dryer:  Daya : 185 kW Put. Motor : 1485 rpm Gearbox : 1485 / rpm  Rigid Foundation  		1	1.63	3.43	2.16	1.32
2	3.44			1.74	3.93	0.61	B	
3	1.39			0.56	0.73	0.23	A	
4	1.12			0.62	0.51	0.17	A	
5	—			—	—	—	—	
6	1.54			0.55	0.73	0.08	A	
7	—			—	—	—	—	
8	0.98			0.52	0.72	0.08	A	



• Bulan Agustus



KADEP INSPEKSI TEKNIK - INSPEKSI TEKNIK KHUSUS

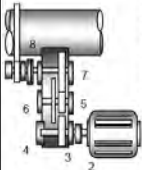
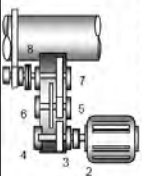
GETARAN MESIN-MESIN KRITIS PABRIK II

BULAN AGUSTUS 2014

Area : Unit NPK III


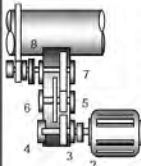
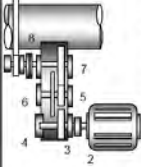
Tgl. diukur : 18 Agustus 2014

Halaman : 6 dari 11

ALAT UKUR : CSI 2130 / 2117A		TITIK UKUR	Overall Vibration					KONDISI GETARAN & REKOMENDASI
STANDAR GETARAN : ISO - 10816-3			HOR	VER	AXIAL	P.Vel	Over All	
DATA MESIN			(mm/s-RMS)					Severity
<div>18 M3112</div> <div>Granulator.</div> <div> <div>Daya : 132 kW</div> <div>Put. Motor : 1490 rpm</div> <div>Gearbox : 1490 / rpm</div> </div> <div>Rigid Foundation</div> 	1	1.24	1.12	1.48	0.46	A	* Pengukuran bulan Juli 2014.	
	2	1.44	0.86	1.43	0.49	A		
	3	0.97	0.52	1.43	0.68	A		
	4	1.15	0.57	0.95	0.56	A		
	5	-	-	-	-	-		
	6	-	-	-	-	-		
	7	-	-	-	-	-		
	8	1.11	0.36	1.27	0.10	A		
								<div>"GOOD"</div> <div>(getaran stabil dibanding sebelumnya)</div>
	1	1.27	1.12	0.92	0.43	A		
	2	1.56	0.67	1.29	0.41	A		
	3	0.73	0.53	1.30	0.22	A		
	4	0.76	0.64	1.21	0.14	A		
	5	-	-	-	-	-		
	6	-	-	-	-	-		
	7	0.75	0.65	1.32	0.07	A		
	8	0.93	0.48	1.14	0.08	A		
<div>18 M3114</div> <div>Dryer</div> <div> <div>Daya : 185 kW</div> <div>Put. Motor : 1485 rpm</div> <div>Gearbox : 1485 / rpm</div> </div> <div>Rigid Foundation</div> 	1	1.93	3.43	2.16	1.32	B	* Pengukuran bulan Juli 2014.	
	2	3.44	1.74	3.93	0.61	B		
	3	1.39	0.56	0.73	0.23	A		
	4	1.12	0.62	0.51	0.17	A		
	5	-	-	-	-	-		
	6	1.54	0.55	0.73	0.06	A		
	7	-	-	-	-	-		
	8	0.96	0.52	0.72	0.08	A		
								<div>"FAIR"</div> <div>(getaran turun dibanding sebelumnya)</div>
	1	1.42	2.53	1.25	0.28	B		
	2	2.65	1.49	2.27	0.15	B		
	3	1.02	0.55	0.52	0.21	A		
	4	0.78	0.60	0.62	0.18	A		
	5	-	-	-	-	-		
	6	1.25	0.47	0.61	0	A		
	7	-	-	-	-	-		
	8	0.96	0.52	0.72	0.08	A		



• **Bulan September**

		KADEP INSPEKSI TEKNIK - INSPEKSI TEKNIK KHUSUS GETARAN MESIN-MESIN KRITIS PABRIK II BULAN AGUSTUS 2014				Area : Unit NPK III Tgl. diukur : 18 Agustus 2014 Halaman : 6 dari 11	
ALAT UKUR : CSI 2130 / 2117A STANDAR GETARAN : ISO - 10816-3		TITIK UKUR	Overall Vibration HOR.   VER.   AXIAL   P/Vib Gms   Over All Severity				KONDISI GETARAN & REKOMENDASI
DATA MESIN							
<b>18 M3112</b> Granulator.  Daya : 132 kW Put. Motor : 1490 rpm Gearbox : 1490 / rpm. Rigid Foundation  	1	1.24	1.12	1.48	0.46	A	* Pengukuran bulan Juli 2014.
	2	1.44	0.86	1.43	0.49	A	
	3	0.97	0.52	1.43	0.68	A	
	4	1.15	0.57	0.96	0.56	A	
	5	-	-	-	-	-	
	6	-	-	-	-	-	
	7	-	-	-	-	-	
	8	1.11	0.36	1.27	0.10	A	
	1	1.27	1.12	0.92	0.43	A	"GOOD" (getaran stabil dibanding sebelumnya)
	2	1.56	0.67	1.29	0.41	A	
	3	0.73	0.53	1.30	0.22	A	
	4	0.78	0.64	1.21	0.14	A	
	5	-	-	-	-	-	
	6	-	-	-	-	-	
	7	0.75	0.65	1.32	0.07	A	
	8	0.93	0.46	1.14	0.08	A	
	<b>18 M3114</b> Dryer  Daya : 185 kW Put. Motor : 1485 rpm Gearbox : 1485 / rpm. Rigid Foundation  	1	1.93	3.43	2.16	1.32	B
2		3.44	1.74	3.68	0.61	B	
3		1.39	0.56	0.73	0.23	A	
4		1.12	0.62	0.51	0.17	A	
5		-	-	-	-	-	
6		1.54	0.55	0.73	0.06	A	
7		-	-	-	-	-	
8		0.96	0.52	0.72	0.08	A	
1		1.42	2.53	1.25	0.28	B	"FAIR" (getaran turun dibanding sebelumnya)
2		2.65	1.49	2.27	0.15	B	
3		1.02	0.55	0.52	0.21	A	
4		0.78	0.60	0.62	0.18	A	
5		-	-	-	-	-	
6		1.25	0.47	0.61	0	A	
7		-	-	-	-	-	
8		0.96	0.52	0.72	0.08	A	



## B. Perhitungan Tegangan

Diketahui :

- Daya (P) = 200 kw
- Kecepatan Putar (n) = 1.500 rpm
- Lebar (l) = 4 mm = 0,004 m
- Panjang (P) = 51 mm = 0,051 m
- *Safety Factor* = 2

Ditanya : Perbandingan Tegangan maksimal pada material dengan standart

Dijawab :

- Mencari Nilai torsi

$$P = T \times n$$

Dimana, P = Daya (kw)

T = Torsi (N.m)

N = Kecepatan Putar (rpm)

$$T = \frac{CPK}{n}$$

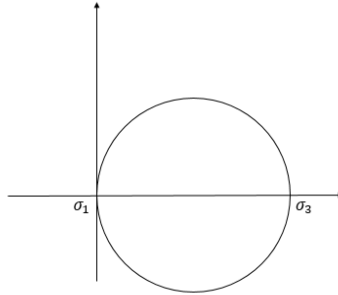
Dimana, C = Faktor Konvensi Satuan

K=Faktor Layanan Aplikasi

$$T = \frac{9549 \times 200 \times 5}{1.500}$$

$$T = 6.366 \text{ N.m}$$

- Metode Tresca



$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

Dimana,  $2 \tau = \sigma_\gamma$

$$\sigma_\gamma = \sigma_1 - \sigma_3$$

Karena pembebanan secara uniaxial, maka dapat disimpulkan bahwa :

$$\sigma_3 = 0$$

Sehingga,

$$\sigma_\gamma = \sigma_1 - 0$$

$$\sigma_\gamma = \sigma_1$$

Sehingga,

$$\sigma_1 = \frac{F}{A}$$

Dimana, F = Gaya (N)

A = Luas Penampang (m<sup>2</sup>)



- Mencari Nilai F

$$T = F \times r$$

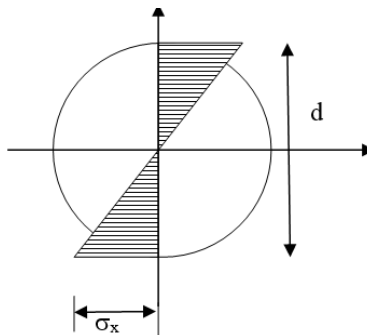
Dimana, r = jari – jari (m)

$$F = \frac{T}{r}$$

$$F = \frac{6.366 \text{ N.m}}{0,317}$$

$$F = 20.082,02 \text{ N}$$

- Mencari Luas penampang



$$A = p \times l$$

$$A = 0,051 \times 0,004$$

$$A = 204 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

- Mencari tegangan yang bekerja pada Kopling Fluida

$$\sigma_1 = \frac{F}{A}$$

$$\sigma_1 = \frac{20.082,02 \text{ N}}{204 \times 10^{-6} \text{ m}^2}$$

$$\sigma_1 = 98.44 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

- Safety Factor

$$S_f = \sigma_1 \times 2$$

$$\sigma_1 = 98.44 \times 10^6 \text{ N/m}^2 \times 2$$

$$S_f = 196,88 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

- Konversi satuan Pa menjadi MPa

$$196,88 \times 10^6 \text{ N/m}^2 = 196,88 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$196,88 \times 10^6 \text{ Pa} = 196,88 \text{ MPa}$$



- Perbandingan Tegangan Maksimal pada Material dengan Standart

$$\sigma_1 > \sigma_Y$$

$$196.88 \text{ MPa} > 140 \text{ MPa}$$

### C. ASTM E140-02 (Standart Hardness Conversion For Metals)

TABLE 9 Approximate Hardness Conversion Numbers for Wrought Aluminum Products<sup>A, B, C</sup>

Brinell Hardness Number 500-kgf, (10-mm Ball) (HBS)	Vickers Hardness Number 15-kgf, (HV)	Rockwell Hardness Number			Rockwell Superficial Hardness Number		
		B Scale 100-kgf, ½-in. Ball (HRB)	E Scale 100-kgf, ½-in. Ball (HRE)	H Scale 60-kgf, ½-in. Ball (HRH)	15-T Scale 15-kgf, ½-in. Ball (HR 15-T)	30-T Scale 30-kgf, ½-in. Ball (HR 30-T)	15-W Scale 15-kgf, ½-in. Ball (HR 15-W)
160	189	91	...	...	89	77	95
155	183	90	...	...	89	76	95
150	177	89	...	...	89	75	94
145	171	87	...	...	88	74	94
140	165	86	...	...	88	73	94
135	159	84	...	...	87	71	93
130	153	81	...	...	87	70	93
125	147	79	...	...	86	68	92
120	141	76	...	...	86	67	92
115	135	72	101	...	86	65	91
110	129	69	100	...	85	63	91
105	123	65	99	...	84	61	91
100	117	60	98	...	83	59	90
95	111	56	96	...	82	57	90
90	105	51	94	108	81	54	89
85	98	46	91	107	80	52	89
80	92	40	88	106	78	50	88
75	86	34	84	104	76	47	87
70	80	28	80	102	74	44	86
65	74	...	75	100	72	...	85
60	68	...	70	97	70	...	83
55	62	...	65	94	67	...	82
50	56	...	59	91	64	...	80
45	50	...	53	87	62	...	79
40	44	...	46	83	59	...	77

<sup>A</sup> Data were generated in an interlaboratory test program conducted by ASTM Subcommittee E28.06. Supporting data available from ASTM Headquarters. Request RR: E28-1005.

<sup>B</sup> In table headings, kgf or gf refers to total test force.

<sup>C</sup> Appendix X9 contains equations converting determined hardness scale numbers to Brinell numbers for wrought aluminum products. Refer to 1.11 before using conversion equations.

## BIODATA PENULIS



Penulis yang bernama lengkap Genki Ramadyan Priambadha dilahirkan di Sidoarjo pada tanggal 05 Januari 1993. Penulis merupakan anak pertama dari 3 bersaudara, dan telah menempuh pendidikan formal yaitu SDN Pucang IV Sidoarjo, SMPN 1 Sidoarjo dan SMAN 1 Sidoarjo. Setelah lulus dari SMA,

penulis mengikuti tes dan diterima sebagai calon Mahasiswa Program PMDK Kemitraan Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya 2011. Penulis melanjutkan studi di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS dengan nomor registrasi pokok 2711 100 114.

Semasa kuliah, penulis terdaftar aktif sebagai staff Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa Himpunan Mahasiswa Teknik Material (HMMT) periode 2012-2015. Selain dalam organisasi tingkat jurusan, penulis aktif dalam kegiatan kepanduan di tingkat fakultas dan institut sebagai fasilitator, pemandu, dan pembicara

Selesainya tugas akhir ini mengantarkan penulis memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) pada Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Email : [genkiramadyan@gmail.com](mailto:genkiramadyan@gmail.com)

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*